

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Technická diagnostika netočivých elektrických strojů
Technical diagnostics of non - rotating electrical machines

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Bohumil Markus**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Technická diagnostika netočivých elektrických strojů**
Technical diagnostics of non-rotating electrical machines

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Popis diagnostických metod
3. Aplikace diagnostických metod na vybraném stroji
4. Vyhodnocení naměřených dat
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Bernat, P., Mišák, S.: Diagnostika asynchronního stroje. In Sborník konference EPE 2011. Ed. Stanislav Rusek, Radomír Goňo, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, 179-182, ISBN 978-80-248-2393-5
[2] Kreidl, M.: Diagnostické systémy, Praha, 2001, ČVUT, ISBN 80-01-02349-4
[3] Záliš, K.: Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů, Praha 2005, Academia, ISBN 80-200-1358-X

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



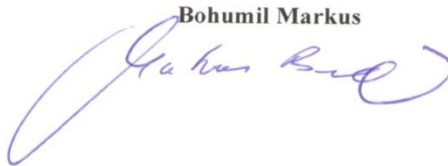
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Orlové dne 2.5.2014

Bohumil Markus



Abstrakt

Tato práce se zabývá technickou diagnostikou transformátorů, a to jak z hlediska preventivní údržby těchto strojů, řešení poruchových stavů, tak i ve sledování dlouhodobého vývoje (trendů) vyhodnocovaných parametrů tohoto zařízení.

První část práce je věnována popisu diagnostických metod, které se používají u těchto netočivých elektrických strojů. Druhá část je zaměřena na aplikaci zvolených metod technické diagnostiky pro určení technického stavu vybraného olejového transformátoru. Ve třetí části je provedeno vyhodnocení naměřených veličin jednotlivých metod a z nich vyplývající závěr pro další provozování diagnostikovaného olejového transformátoru. Čtvrtá, závěrečná část souhrnně hodnotí přínos technické diagnostiky ve významu provozování, údržby a životnosti výkonových olejových transformátorů. Taktéž posuzuje důležitost jednotlivých metod použitých při diagnostice vybraného transformátoru.

Klíčová slova

Transformátor vn, převod transformátoru, transformátorový olej, technická diagnostika, izolační odpor, polarizační index, dielektrická absorpce, odpor vinutí, ztrátový činitel, primárním a sekundárním vinutí, termovizní měření, magnetické pole.

Abstract

The thesis deals with technical diagnostics of transformers focusing on preventive maintenance of these devices, solving faults in transformers as well as considering long-term trends of evaluated parameters of these devices.

The first part is concerned with the description of diagnostics methods that are applied to these non-rotating electrical devices. The second part aims at looking into particular technical diagnostics methods applied for determining technical condition of the selected oil transformer. The third part follows up the evaluation of quantities measured applying the individual methods and finally it presents the conclusion for operating the diagnosed oil transformer. The final part sums up benefits of technical diagnostics for operating, maintenance and life efficiency of oil transformers. Also, it considers the importance of individual methods applied for diagnostics of the selected transformer.

Keywords

Transformer hv, transformer transmission, transformer oil, technical diagnostics, insulation resistance, polarity index, dielectric absorption, winding resistance, dissipation factor, primary and secondary winding, thermovisual measuring, magnetic field.

Seznam použitých symbolů a zkratek

U_n jmenovité napětí (V)

PC..... osobní počítač

OLCT..... Off Line Tesla Coil (regulátor napětí)

AVR..... Automatic Voltage Regulator (regulace napětí)

VN..... vinutí vyššího napětí konkrétního transformátoru

SN..... vinutí středního napětí konkrétního transformátoru

NN..... vinutí nižšího napětí konkrétního transformátoru

k..... uzemnění, kostra, nádoba konkrétního transformátoru

MaR..... Měření a Regulace

ONAN..... transformátor s olejovým chlazením v uzavřené nádobě
(ochlazovaná vzduchem)

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. POPIS DIAGNOSTICKÝCH METOD	2
2.1 OFF – LINE DIAGNOSTIKA	2
2.1.1 Měření činného odporu vinutí	2
2.1.2 Měření převodu, napětí naprázdno a ztrát naprázdno	4
2.1.3 Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	8
2.1.4 Měření izolačního odporu vinutí	10
2.1.5 Měření ztrátového činitele $\tan \delta$ a kapacity vinutí	12
2.1.6 Impulsní (rázová) srovnávací zkouška	15
2.1.7 Transformátorový olej a jeho diagnostika	16
2.1.8 Vizuální kontrola transformátoru	20
2.1.9 Měření poměru kapacit C_2/C_{50}	20
2.1.10 Infračervená termografie	23
2.2 ON – LINE DIAGNOSTIKA	24
3. APLIKACE DIAGNOSTICKÝCH METOD NA VYBRANÉM STROJI	29
3.1 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA STAVU VÝKONOVÉHO TRANSFORMÁTORU	29
3.1.1 Zadání	29
3.1.2 Parametry diagnostikovaného zařízení	29
3.1.3 Vizuální kontrola transformátoru	30
3.1.4 Aplikace diagnostické metody – měření transformátoru naprázdno	30
3.1.5 Aplikace diagnostické metody – měření ztrátového činitele	34
3.1.6 Aplikace diagnostické metody – impulsní srovnávací zkouška	36
3.1.7 Aplikace diagnostické metody – měření izolačního odporu vinutí	38
3.1.8 Aplikace diagnostické metody – transformátorový olej	40
3.1.9 Aplikace diagnostické metody – infračervená termografie	49
4. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	55
4.1 HODNOCENÍ TECHNICKÉHO STAVU TRANSFORMÁTORU DLE JEDNOTLIVÝCH DIAGNOSTICKÝCH METOD	55
4.1.1 Trend vývoje jednotlivých kritérií (2010 – 2013)	57
4.2 ZÁVĚREČNÉ HODNOCENÍ DIAGNOSTIKOVANÉHO TRANSFORMÁTORU	58
4.3 HODNOCENÍ METOD POUŽITÝCH U DIAGNOSTIKY TRANSFORMÁTORU	59
4.3.1 Celkové hodnocení jednotlivých diagnostických metod	60
5. ZÁVĚR	62
POUŽITÁ LITERATURA	63
SEZNAM OBRÁZKŮ	66
SEZNAM TABULEK	68
SEZNAM PŘÍLOH	69

1. Úvod

Technická diagnostika je obor zabývající se rozpoznáním obvykle nežádoucích stavů a zkoumáním příčin jejich vzniku. Jejím výsledkem bývá vyhodnocení provozuschopnosti testovaného zařízení, detekce i lokalizace závad a také předpokládaný vývoj stavu zařízení při dalším provozu včetně pokynů pro údržbu.

Dopady diagnostiky je ovšem nutné spatřovat v širším kontextu, a to zejména také v rozboru příčin poruch, k nimž dochází během provozu zařízení. Vzniklé poruchy jsou zaznamenávány, tříděny a archivovány v databázích. Z rozboru jejich příčin pak vyplývají mnohá nesmírně cenná fakta a informace. Jedná se zejména o návrhy směřující ke změnám konstrukce dotyčného zařízení, které mohou nastat při opakujících se poruchách na tomto zařízení. Diagnostika je pak nositelkou zlepšení zařízení vedoucí k eliminaci prvků a částí, které byly příčinou opakovaných poruch. Stejně tak se výsledků rozboru poruch využívá i ve smyslu úprav pracovního prostředí, v němž zařízení pracuje. To se děje tehdy, jestliže opakované poruchy signalizují přetěžování zařízení ze strany parametrů provozního prostředí. Instrukce diagnostiky pak vedou ke krokům odstraňujícím tento zátěžový faktor.

Z hlediska provádění vlastních diagnostických šetření existují dva zásadní způsoby získávání dat, a to buď pomocí off – line – testovací diagnostiky nebo on – line – funkční diagnostiky.

Při off - line diagnostice zařízení nejdříve odstavíme z provozu a poté změříme všechna potřebná data. U on - line diagnostiky získáváme data pomocí senzorů a to během provozu. Tato metoda přináší řadu výhod. Sledovaný objekt se neustále nachází pod kontrolou, podléhá automatickému vyhodnocení údajů a včasnému rozpoznání nežádoucího stavu. Nevýhodou je pak vyšší technická náročnost a potřeba zpracování většího množství dat. V rámci této diplomové práce byla zkoumána data z off - line diagnostiky výkonového olejového transformátoru. Na základě vyhodnocení těchto dat byl proveden rozbor spolehlivosti a plán dalšího provozu tohoto netočivého elektrického stroje. [1, 2, 12]

Výkonové olejové transformátory jsou jedním z nejdůležitějších prvků v distribuci elektrické energie, která je vedena od výrobce ke spotřebiteli. U transformátorů se vyskytují různé druhy poruch, které mohou způsobit přerušení dodávek elektrické energie, újmu na zdraví obsluhy, ztráty na lidských životech, poruchy dalších technických zařízení a v neposlední řadě škody v průmyslové výrobě nebo nemalé ekonomické ztráty. Z těchto důvodů je nutné provádět pravidelná diagnostická šetření a získaná data vhodně vyhodnocovat.

2. Popis diagnostických metod

2.1 Off – line diagnostika

2.1.1 Měření činného odporu vinutí

Měření činného odporu se provádí pro všechna vinutí na výstupní a vstupní straně transformátoru. Odpor se měří na všech odbočkách vinutí. Tyto jsou přístupny pro připojení měřicích přístrojů při všech polohách přepínače odboček vinutí. Před měřením musíme transformátor bezpečně odpojit od sítě (na primární i sekundární straně). Teplota stroje by měla být přibližně shodná s teplotou okolí. Odpor se měří buď přímou, nebo můstkovou metodou. Během měření odporu jednoho vinutí musí být ostatní vinutí rozpojena. Velikost proudu při měření nesmí převýšit 0,2 násobek hodnoty jmenovitého proudu vinutí. Pro snížení doby ustálení proudu se doporučuje volit hodnotu proudu nejméně $2\sqrt{2}I_0$, kde I_0 je efektivní hodnota proudu naprázdno odpovídající jmenovitému napětí transformátoru. Odpor každé fáze zvlášť měříme jen tehdy, pokud jsou přístupny všechny konce vinutí. Jsou-li fáze trvale spojeny do hvězdy nebo trojúhelníku viz obr. 1, měříme odpor mezi dvojicemi svorek (začátků vinutí) a z těchto hodnot pak vypočítáme odpor jednotlivých fází. Příklad měřicího přístroje používaného pro měření činného odporu vinutí je na obr. 2. [1, 2, 3, 12, 13]

Činný odpor měříme mezi svorkami U, V, W - R_{UV} , R_{UW} , R_{VW} . Pokud zjišťujeme jen střední hodnotu odporu jedné fáze, nebo když se naměřené hodnoty odporů mezi svorkami liší pouze minimálně, můžeme stanovit odpor fáze R_f jako střední hodnotu z naměřených hodnot dle následujícího vztahu [1]:

$$R_f = \frac{1}{6}(R_{UV} + R_{UW} + R_{VW}) (\Omega) \quad (2.1)$$

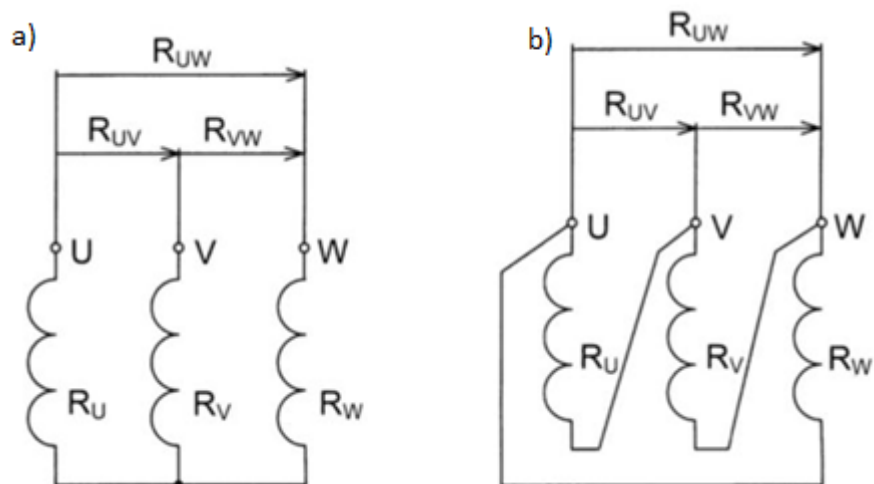
Pokud jsou naměřené hodnoty odporů mezi svorkami stejné, nebo přibližně stejné, můžeme vypočítat odpor fází dle vztahů:

Pro připojení do hvězdy [1]:

$$R_f = 0,5 \cdot R_s (\Omega) \quad (2.2)$$

Pro připojení do trojúhelníku [1]:

$$R_f = 1,5 \cdot R_s (\Omega) \quad (2.3)$$



obr. 1 Možnosti zapojení vinutí: a) vinutí spojené do hvězdy, b) vinutí spojené do trojúhelníku [2].

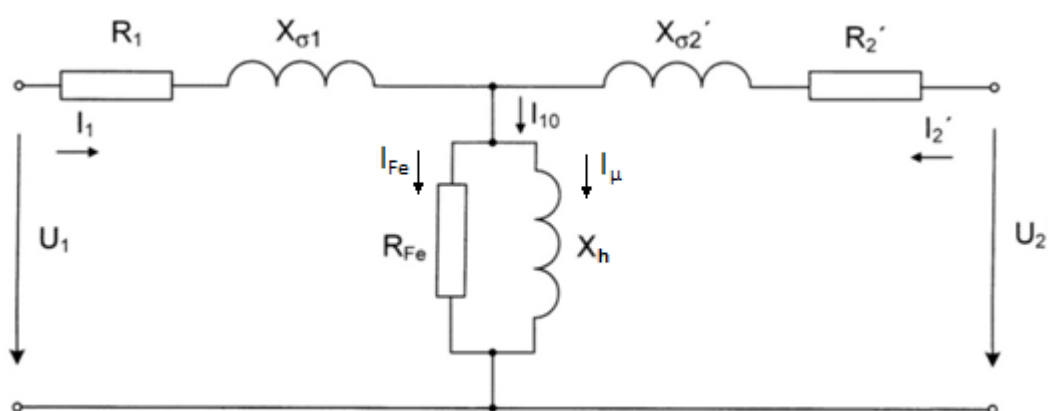


obr. 2 Měřicí přístroj odporu vinutí Raytech WR50-12.

2.1.2 Měření převodu, napětí naprázdno a ztrát naprázdno

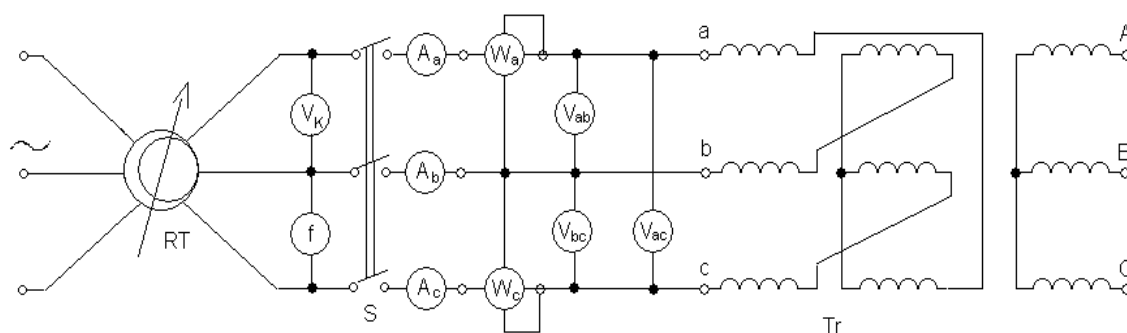
Stav naprázdno je stavem transformátoru, kdy je sekundární proud $I_2 = 0$. Primárním vinutím přesto protéká tzv. magnetizační proud I_{10} . Tento proud je nutný pro vybudování magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru při jmenovitém napětí. I_{10} Tento proud se skládá ze dvou složek, kdy první složka reprezentuje hlavní indukčnost L_μ a je fázově posunuta o 90° elektrických za fázorem proudu a druhá složka reprezentuje hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Tato složka je ve fázi s vektorem napětí. Parametrické vyjádření lze provést pomocí fiktivního odporu R_{Fe} , na kterém tyto ztráty vznikají. Podle náhradního schématu, viz obr. 3, můžeme definovat rozptylovou impedanci vstupu a výstupu $Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$, $Z_2' = R_2' + jX_{\sigma 2}'$, impedanci příčné větve náhradního schématu, jako paralelní kombinaci odporu R_{Fe} a reaktance jX_h , kde $Z_0 = R_{Fe} + jX_h / R_{Fe} * jX_h$ a proud $I_0 = I_\mu + I_{Fe}$.

[1, 11, 12]

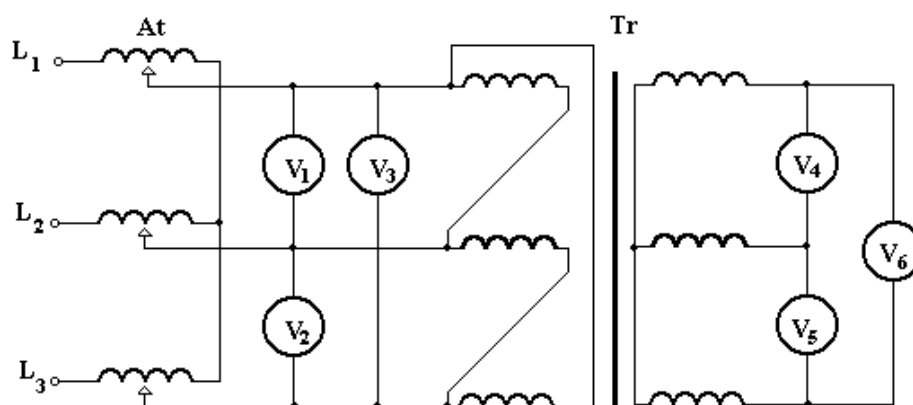


obr. 3 Náhradní schéma transformátoru [11].

Cílem měření naprázdno je zjistit ztráty v železe, proud naprázdno a účinník naprázdno při jmenovitém napětí a jmenovité frekvenci. Někdy se měří současně převod napětí, pokud se měří pomocí voltmetrů, nebo neměří-li se převod při kontrole spojení vinutí, viz schéma zapojení na obr. 5. Současně s těmito zkouškami se obvykle ještě provádí kontrola závitové izolace, kontrola hlučnosti jádra při plné indukci a kontrola vyrovnávacích proudů v paralelních větvích vinutí. Měření je zpravidla provedeno s ohledem na požadavky jednoduchosti, přesnosti a bezpečnosti na straně nižšího napětí za účelem zjištění závislosti sledovaných veličin na napětí v rozsahu $(0,5 \text{ až } 1,2)U_n$, kdy hodnoty pro jmenovité napětí se pak odečtou z grafů. Schéma zapojení pro měření s použitím dvou wattmetrů v Aronově zapojení je na obr. 4. Napětíové cívký wattmetrů jsou zapojovány za cívký proudové, aby bylo možné jednoduše určit korekci pro vlastní spotřebu přístrojů. Strana vyššího napětí je rozpojená. V praxi pro měření ztrát naprázdno je možno použít například analyzátor BK ELCOM v provedení PNA 560 viz obr. 6. [3, 12]



obr. 4 Schéma zapojení pro měření naprázdno na trojfázovém transformátoru s použitím dvou wattmetrů v Aronově zapojení [1].



obr. 5 Schéma zapojení měření převodu napětí [3].

Transformátor ve stavu naprázdno odebírá ze sítě příkon na pokrytí ztrát v železe ΔP_{Fe} (ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy) a ztrát v napájeném vinutí, kterým teče proud naprázdno. Ztráty v železe jsou přibližně úměrné druhé mocnině magnetické indukce, přičemž indukce je přímo úměrná napětí. Tedy ve stavu naprázdno budou ztráty v železe při jmenovitém napětí rovněž jmenovité. Ztráty ve vinutí budou ve srovnání se ztrátami v železe velmi malé, neboť i proud naprázdno je velmi malý.

[8, 11]



obr. 6 Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA560 pro měření transformátoru ve stavu naprázdno.

Při zpracování naměřených hodnot je možné postupovat na základě těchto výpočtů:

Vypočítáme střední hodnotu sdruženého napětí a proudů naprázdno [8, 11]:

$$U_Z = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3} \quad (V) \quad (2.4)$$

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (A) \quad (2.5)$$

Pro měření příkonu dvěma wattmetry bude vztah [11]:

$$P'_{10} = W_a \pm W_b \quad (W) \quad (2.6)$$

Musíme brát v úvahu vlastní spotřebu přístrojů a pak platí pro příkon naprázdno vztah [11]:

$$P_{10} = P'_{10} - \Delta P_{KOR} \quad (W) \quad (2.7)$$

Z toho vztah pro vlastní spotřebu [11]:

$$\Delta P_{KOR} = U_Z^2 \cdot \left(\frac{1}{R_{Wa}} + \frac{1}{R_{Wb}} + \frac{1}{R_{Vab}} + \frac{1}{R_{Vbc}} + \frac{1}{R_{Vca}} \right) \quad (W) \quad (2.8)$$

Po vypočítání hodnot napětí, proudu a příkonu naprázdno je možné určit účinník naprázdno dle vztahu [11]:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} \cdot U_Z \cdot I_0} \quad (-) \quad (2.9)$$

Po odečtení ztrát ve vinutí od příkonu naprázdno dostaneme ztráty v železe [11]:

$$\Delta P_{Fe} = P_{10} - \Delta P_{j0} \quad (W) \quad (2.10)$$

Pak ztráty ve vinutí budou [11]:

$$\Delta P_{j0} = 1,5 \cdot R_S \cdot I_0^2 \quad (W) \quad (2.11)$$

Pokud měříme příkon třemi wattmetry, pak je příkon naprázdno určen dle vztahu [11]:

$$P_{10} = W_a + W_b + W_c \quad (W) \quad (2.12)$$

Pak účinník naprázdno je vypočten dle vztahu [8]:

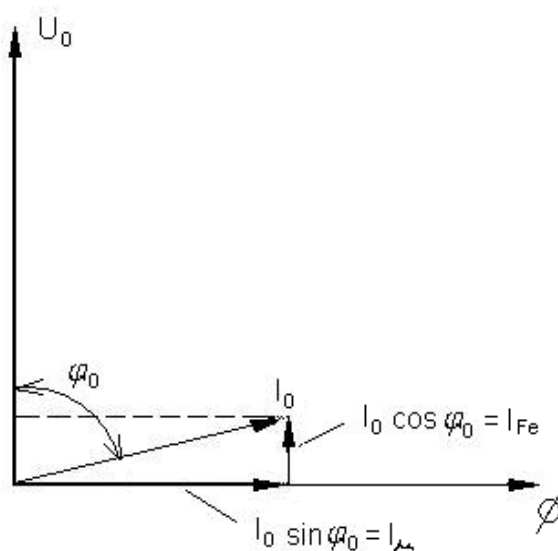
$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{3 \cdot I_0 \cdot U_0} \quad (-) \quad (2.13)$$

Kde [11]:

$$U_0 = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} \quad (V) \quad (2.14)$$

$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (A) \quad (2.15)$$

Z výsledků měření můžeme sestavit zjednodušený fázorový diagram 3fázového transformátoru, viz obr. 7.



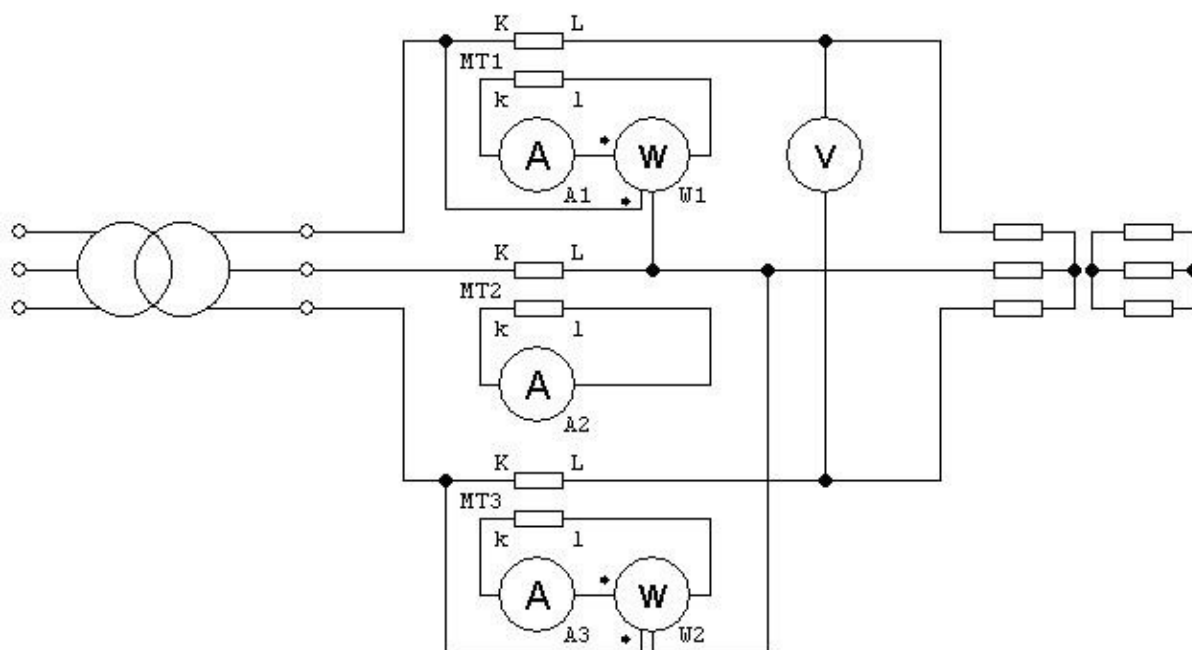
obr. 7 Zjednodušený fázorový diagram 3fázového transformátoru ve stavu naprázdno [11].

2.1.3 Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko

Stav nakrátko je stavem transformátoru, při kterém jsou sekundární svorky zkratovány. Zkratový proud tekoucí sekundárním vinutím je dán tvrdostí transformátoru a je značně vysoký. Transformátor při chodu nakrátko se jeví jako tlumivka o impedanci Z_{1K} , jejíž reálná část R_{1K} je součtem ohmického odporu vstupního vinutí a přepočteného odporu výstupního vinutí $R_1 + R'_2$ a imaginární část je dána součtem rozptylových reaktancí $X_{\sigma 1}$ a $X_{\sigma 2}$. Abychom mohli určit tyto parametry je nejlépe měřit transformátor tak, aby pracoval v oblasti nenasyčení magnetického obvodu ale při jmenovitém proudu (příčná impedance Z_0 je vzhledem k impedanci Z_K zanedbatelná). Můžeme ho dosáhnout tak, že zkratujeme sekundární vinutí a svorky primárního vinutí připojíme na výstupní svorky regulačního transformátoru, viz schéma zapojení na obr. 8. Když budeme zvyšovat napětí, pak začne růst i proud protékající vinutími. Jakmile proud dosáhne hodnoty jmenovitého proudu I_{1K} dosáhli jsme stavu nakrátko a odečteme hodnotu odpovídajícího napětí U_{1K} . Toto napětí je napětím nakrátko, jeden z provozních parametrů transformátoru. Měření nakrátko lze realizovat například pomocí analyzátoru BK ELCOM v provedení ENA 500.12 viz obr. 9. Pomocí převrácené hodnoty procentního napětí nakrátko lze určit ustálený zkratový proud při jmenovitém napětí. [11, 13]

Impedance nakrátko je celková hodnota nahrazující sériové zapojení dvou odporů $R_1 + R'_2$ a dvou reaktancí rozptylových indukčností popisující primární a sekundární vinutí. Často se uvádí, že přepočítané parametry sekundárního vinutí jsou hodnotově stejné jako parametry primárního vinutí. Proto lze také napsat, že $R_1 = R'_2$ a $X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2}$.

Důležitou hodnotou při měření nakrátko jsou ztráty ΔP_K (tzv. ztráty nakrátko nebo ztráty ve vinutí) vznikající průchodem proudu vinutím. Odpovídají činnému odporu vinutí a jsou kvalitativním parametrem (spolu se ztrátami naprázdno ΔP_0) určující účinnost přenosu elektrické energie transformátorem. [1, 11, 15]



obr. 8 Schéma zapojení pro měření ztrát a napětí nakrátko trojfázových transformátorů [1].



obr. 9 Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA500.12 pro měření transformátoru ve stavu nakrátko.

Hodnota vstupního proudu se vypočte jako střední hodnota napětí jednotlivých fází [22]:

$$I_1 = \frac{I_{1U} + I_{1V} + I_{1W}}{3} \quad (A) \quad (2.16)$$

Hodnota vstupního napětí se vypočte jako střední hodnota napětí jednotlivých fází [22]:

$$U_1 = \frac{U_{1U} + U_{1V} + U_{1W}}{3} \quad (V) \quad (2.17)$$

Celkový činný výkon dodávaný do transformátoru je roven součtu výkonů jednotlivých fází [11]:

$$P_1 = P_{1U} + P_{1V} + P_{1W} \quad (W) \quad (2.18)$$

Zdánlivý dodávaný výkon transformátoru je roven trojnásobku součinu vstupního napětí a proudu [11]:

$$S_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \quad (V \cdot A) \quad (2.19)$$

Účinník transformátoru pro dané napětí je roven podílu činného výkonu a zdánlivého výkonu [8]:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (-) \quad (2.20)$$

Procentní napětí nakrátko [8]:

$$u_k = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.21)$$

2.1.4 Měření izolačního odporu vinutí

Mezi nejstarší diagnostické metody transformátorů patří bezesporu měření izolačního odporu vinutí. Izolační odpor velmi citlivě reaguje na nejslabší místo systému izolace transformátoru. Pokles izolačního odporu je často spojován s vlhkostí a nečistotami, které jsou vodivé.

Následující parametry se používají pro hodnocení izolace elektrických strojů z hlediska jejího stárnutí. Měření izolačního odporu je u takových zařízení rušeno relativně vysokými proudy a to vybíjecími proudy kapacit a dielektrickými posuvnými proudy, které doznívají teprve časem. Aby byl změřen skutečný ztrátový proud, který protéká přes izolaci, musí měření probíhat po určitou dobu, aby byly vyloučeny počáteční rušivé proudy. Potom lze z průběhu doznívání vypočítat hodnoty PI nebo DAR a následně porovnat v tab. 1. [2, 5, 13, 20]

Index polarizace – PI [2]

$$PI_{600} = \frac{R_{600s}}{R_{60s}} \quad (-) \quad (2.22)$$

$$PI_{60} = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} \quad (-) \quad (2.23)$$

Koeficient dielektrické absorpce – DAR [2]

$$DAR = \frac{R_{1min}}{R_{30s}} \quad (-) \quad (2.24)$$

tab. 1 Posouzení kvality izolace [2]

DAR	PI	Stav izolace
< 1,25	< 1	Nedostatečný nebo nebezpečný
	< 2	
< 1,6	< 4	Dobrý
> 1,6	> 4	Velmi dobrý, výborný

Pro vícevrstvá dielektrika, kde je porušen pouze jeden izolant, ale ostatní izolanty vykazují vysokou hodnotu izolačního odporu, jsou vypočtené hodnoty poměrů PI a DAR nedostatečné pro určení problému. Proto je nutné doplnit tato měření o test vybíjení dielektrika DD. Tento test ignoruje paralelní povrchové unikající proudy. Zkušební napětí se přiloží na měřený objekt po definovanou dobu. Poté přístroj spustí rychlé vybíjení a měří její kapacitu a po uplynutí jedné minuty se měří unikající proud, porovnání posuzujeme dle tab. 2. [1, 2, 3, 5, 15]

Test vybíjení dielektrika - DD [2]

$$DD = \frac{I_{1min}}{U \cdot C} \quad (mA, V, F) \quad (2.25)$$

tab. 2 Posouzení kvality izolace [2]

DD	Stav izolace
DD > 7	Velmi špatný
7 > DD > 4	Špatný
4 > DD > 2	Nejasný
DD < 2	Velmi dobrý



obr. 10 Měřič izolačních odporů Sefelec SE6545.

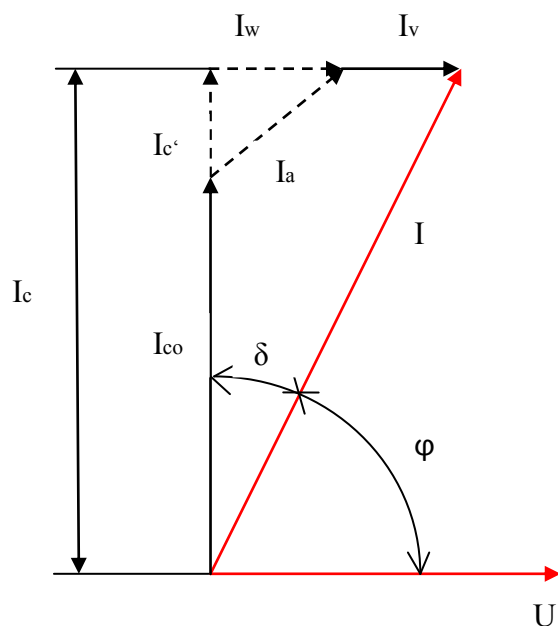
2.1.5 Měření ztrátového činitele $\tan \delta$ a kapacity vinutí

Pomocí ztrátového činitele posuzujeme celkový stav izolace a z jeho velikosti, kterou ovlivňuje pevná a kapalná část dielektrika, můžeme indikovat, zda je izolační soustava provozně zestárlá nebo navlhla. Z hlediska ztrátového činitele pohlížíme na izolaci strojů jako na dielektrikum řady kondenzátorů, jejichž elektrody tvoří nejen vinutí, ale i železo magnetického obvodu. Pro hodnocení se kapacita vinutí sama osobě nepoužívá, avšak její změny mohou indikovat poškození izolace a v případě lokálních poruch i pomoci k jejímu odhalení. [2, 5, 7, 14]

Ztrátový úhel ($\tan \delta$) je definován jako tangens úhlu, o který se liší fázový posun proudu zkoušeného izolantu od fázového posunu proudu ideálního bezetrátového dielektrika – viz obr. 11, kde I_{CO} je kapacitní složka proudu, I_a je absorpční složka a I_v je vodivostní složka proudu, U je přiložené střídavé napětí a I proud procházející dielektrikem. [2, 5, 7, 14]

Ztrátový činitel je ovlivněn polarizací dielektrika a dalšími okolnostmi. Ze změn průběhů $\tan \delta = f(U)$ lze usuzovat stav izolačního systému. Teplota stroje ovlivňuje absolutní velikost $\tan \delta$, ale nemá podstatný vliv na velikost kapacity. Kapacita C se udává v μF , $\tan \delta$ je bezrozměrné číslo.

[2, 5, 15, 25]



obr. 11 Určení ztrátového činitele $\tan \delta$. [11, 12]



obr. 12 Sada pro měření ztrátového činitele $\tan \delta$ Presco AG FT 12.

Hodnota ztrátového činitele souvisí se ztrátovými pochody v dielektriku, které způsobují jeho zahřívání. Dielektrické ztráty P_Z jsou pak rovny [2]:

$$P_Z = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \text{ (W)} \quad (2.26)$$

Ztrátový činitel se měří Scheringovým můstkem, viz obr. 13, kde C_x a R_x jsou kapacita a odpor měřené izolace, IV je nulový indikátor.

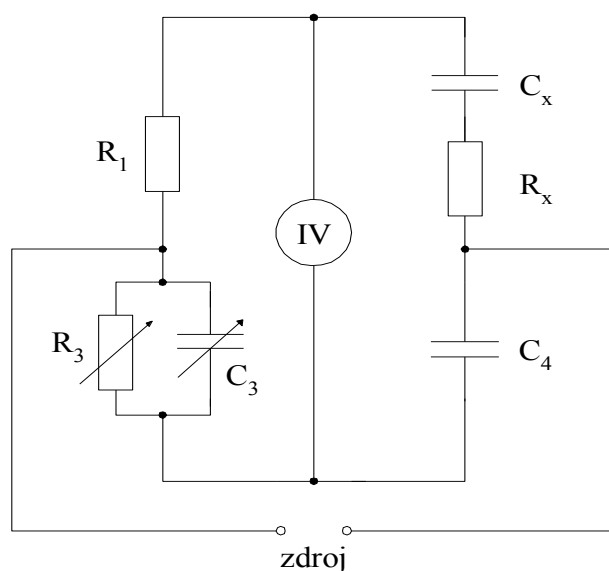
V praxi se dá měřit ztrátový činitel například měřicí sadou Presco AG FT 12, viz obr. 12.

Pro Scheringův můstek platí vztahy [2, 14]:

$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_1} \quad (\mu F) \quad (2.27)$$

$$R_x = R_1 \frac{C_3}{C_4} \quad (\Omega) \quad (2.28)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_3}{R_1} = \omega R_x C_x \quad (-) \quad (2.29)$$



obr. 13 Měření ztrátového činitele Scheringovým můstkem [1].

2.1.6 Impulsní (rázová) srovnávací zkouška

Princip zkoušení je takový, že pomocí rázového generátoru, viz obr. 15, jsou velmi krátké napěťové pulsy přivedeny ke dvěma cívkám současně během zkoušky rázem tak, aby došlo k vytvoření napěťového gradientu přes délku vodiče ve vinutí. Pak tento gradient vytváří okamžité napěťové namáhání mezi závity. Obě cívky budou reagovat v časových úsecích mezi jednotlivými pulsy tlumenými kmity sinusového tvaru. Každá cívka má svůj jednoznačný charakter odezvy, který je možno zobrazit na stínítku připojeného dvoukanálového osciloskopu. Když je jedna z cívek poškozena proti zemi nebo má-li poruchu typu mezizávitového nebo mezifázového zkratu apod., potom je jedna z těchto zobrazovaných křivek odlišná od druhé, viz obr. 16. Jestli se porucha nezjistí ani do dvojnásobku provozního napětí plus 1000 V, pak se vinutí považuje za dobré. [10, 21]

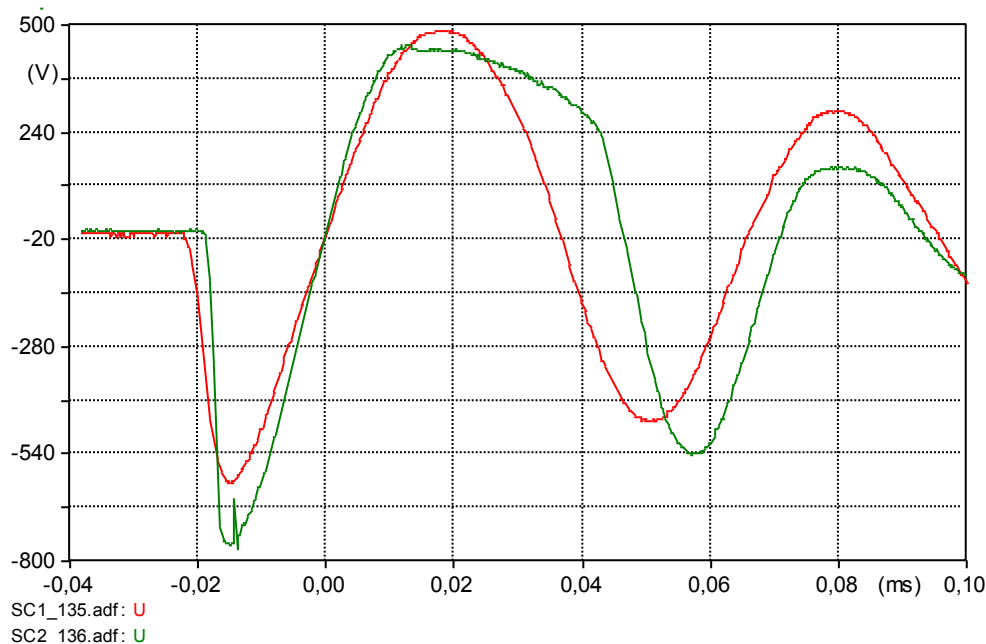
Blokové schéma testerů se strmou vlnou je zobrazeno na obr. 14. Síťové napětí je usměrněno a nabíjejí se kondenzátory. Ve srovnání s klasickou rázovou zkouškou je zde kulové jiskřiště nahrazeno tyristory. Po sepnutí tyristorů se kondenzátory vybíjejí do zkoušeného vinutí. [10, 23]



Obr. 14 Blokové schéma testerů se strmou vlnou. [23]



Obr. 15 Rázový generátor SURGE TESTER PSG 212 A.



obr. 16 Průběh rázové vlny pro dvojici vinutí, vinutí U s poruchou (8x závitový zkrat).

Zkratované nebo chybějící závity způsobí znatelné rozdíly v amplitudě snímaného průběhu a poruchy, jako např. chybná zapojení vinutí způsobí hrubou změnu magnetického pole, což způsobí velké nepravidelnosti ve snímaných průbězích.

Jelikož se jedná o srovnávací zkoušku, nejsme schopni rozpoznat poruchu u těch zkoušených částí strojů, které jsou identicky poškozené. Ale pravděpodobnost vzniku identických poruch nebo identického poškození ve dvou nebo více zkoušených částech stroje (jednotlivá fázová vinutí) je zanedbatelná, a proto se touto možností v praxi nezabýváme. Výhodou této metody je, že poruchy se dají vyhodnotit už při hodnotě špičkového napětí strmé vlny odpovídající jmenovité hodnotě zařízení.

[10, 23]

2.1.7 Transformátorový olej a jeho diagnostika

Transformátorový olej je kapalina, u které jsou podstatné její elektroizolační vlastnosti a termo - oxidační stabilita. Tyto vlastnosti ovlivňují funkci a životnost transformátoru. Vyrábí se z kvalitní ropy, jejíž uhlovodíky se vyznačují dobrou oxidační stálostí. Vhodnými přísadami (inhibitory) se dosáhne zvýšení tepelně oxidační stálosti, zamezí se agresivnímu působení na konstrukční a izolační systém transformátoru apod.

Životnost transformátoru je limitována především životností papírové izolace vinutí, jejíž mechanická pevnost se postupně zmenšuje. Životnost papírové izolace je obvykle podstatně kratší než životnost ostatních konstrukčních prvků. Disproporce mezi životností papírové izolace a ostatních konstrukčních částí se značně zvětšuje, není-li ošetřována olejová náplň transformátoru. Mezi stárnutím oleje a papíru totiž existuje vzájemná závislost: produkty rozkladu oleje jsou absorbovány papírem a naopak, což urychluje proces jejich stárnutí. Jestliže není zestárlá olejová náplň před ukončením své životnosti vyměněna, popř. zregenerována, urychluje se nevratná degradace papírové izolace, a tedy rychleji nastává následná havárie transformátoru. [4, 5, 16, 17, 18]

Stárnutím lze označit soubor pochodů, které v provozních podmínkách vedou ke změnám fyzikálních, chemických nebo elektrických vlastností, jež způsobí zmenšení provozní bezpečnosti zařízení z hlediska izolačních vlastností.

Provozní bezpečnost se zmenšuje především z těchto důvodů [16]:

- zhoršení chlazení následkem usazování, stárnutí vzniklého kalu v olejových kanálcích a na vinutí,
- zmenšení mechanické pevnosti celulózových izolantů následkem jejich napadení kyselinami vzniklými stárnutím,
- zmenšení elektrické pevnosti oleje a izolační soustavy olej-papír vlivem produktů stárnutí, především vody.

Vlivy způsobující stárnutí oleje lze rozdělit na [17]:

- účinek kyslíku za současného působení tepla nebo jiných energií, popř. i katalyzátorů a vody,
- účinek energií (tepelné, elektrického pole a elektrických výbojů),
- účinek chemických látek kyselé a alkalické povahy,
- vliv rovnoměrnosti zatížení, úrovně zatížení, chvění a účinnosti chlazení.

Stárnutí olejů je možné rozdělit na:

- oxidační,
- tepelné,
- vlivem cizích příměsí.

Z těchto důvodů musíme oleje kontrolovat, a to při převímce od dodavatele, před plněním do transformátoru, před uvedením transformátoru do provozu a periodicky v průběhu provozu. Diagnostika je zaměřena na oblasti tepelně-oxidačního zestárnutí olejové náplně a navlhnutí elektroizolačního systému transformátoru s cílem následně optimalizovat provozní údržbu. [9, 15]

Používané metody [18, 26]:***a) Měření izolačních vlastností oleje:***

- měření průrazného napětí,
- měření obsahu vody rozpuštěného v izolačním oleji.

b) Měření jakostních parametrů oleje:

- měření čísla kyselosti,
- měření ztrátového činitele při laboratorní teplotě 90 °C,
- měření relativního mezipovrchové napětí na rozhraní olej-voda,
- měření vnitřní rezistivity při laboratorní teplotě 20 °C,
- měření obsahu inhibitorů.

c) Měření plynové chromatografie oleje***d) Měření celkového obsahu plynů rozpuštěného v izolačním oleji******e) Měření a analýza polarizačního spektra******f) Metody frekvenčních charakteristik******Intervaly provozních kontrol jsou:***

- u transformátorů vvn/vn nad 100 MV·A - 1 x za rok,
- u transformátorů vvn/vn nad 50 MV·A - 1 x za 2 roky,
- u transformátorů vvn/vn do 50 MV·A - 1 x za 4 roky,
- u transformátorů vn/vn a vn/nn - 1 x za 4 roky.

Diagnosticke izolačních kapalin vždy předchází odběr vzorku a jeho následná doprava do laboratoře. Odběru vzorků, jejich uchovávání a dopravě do laboratoře je nutné věnovat náležitou pozornost. V opačném případě může dojít ke zkreslení výsledků z důvodu navlhnutí, odplynění, nebo naopak nasycení vzdušnými plyny a tím k fyzikálně – chemickým změnám. [4, 5, 9]

Vzorky olejů se odebírají dvěma způsoby:

- bez styku odebíraného oleje s atmosférou,
- odběr oleje za přístupu vzduchu.

První způsob se užívá při stanovení plynů, rozpuštěných v oleji a při stanovení obsahu vody. Odběr za přístupu vzduchu do skleněné láhve je postačující pro ostatní zkoušky. Nelze jej provádět za deště, sněžení, mlhy a vysoké relativní vlhkosti vzduchu. Pro stanovení obsahu vody v oleji je nutné odebírat vzorky ze stroje s provozní teplotou.

Limitní hodnoty měřených veličin olejů z provozu [28]:

- průrazné napětí 92 kV/cm, tj. 25 kV/3 mm - číslo kyselosti max. 0,10 (0,20) mg KOH/g, obsah vody max. 30 g/t,
- bod vzplanutí min. 135 °C,
- povrchové napětí min. 25 mV/m,
- ztrátový činitel při 90 °C max. 10, atd.

Pokud nemá olej předepsané parametry, provádí se jeho regenerace, tj. jeho čištění a sušení. Příklad postupu při regeneraci je obr. 18. Při níž se odstraní z oleje pevné nečistoty, voda, vzduch a jiné plyny. Využívá se poznatku, že kyslíkaté organické látky, které vznikly za provozu, se dají v důsledku rozdílné adsorbovatelnosti oddělit od molekul oleje na adsorbční hmotě. Jako adsorbentů se používá hlinka, kysličník hlinitý apod. [17, 18, 26]

Z důvodu zajištění hospodárnosti regenerace musí být splněny limity stanovených vlastností oleje.

Pokud olej těmito limitním hodnotám odpovídá, pak je možné použít dvě možnosti:

- vyměnit olejovou náplň za regenerovaný transformátorový olej,
- zregenerovat olejovou náplň přímo na místě ve stroji.

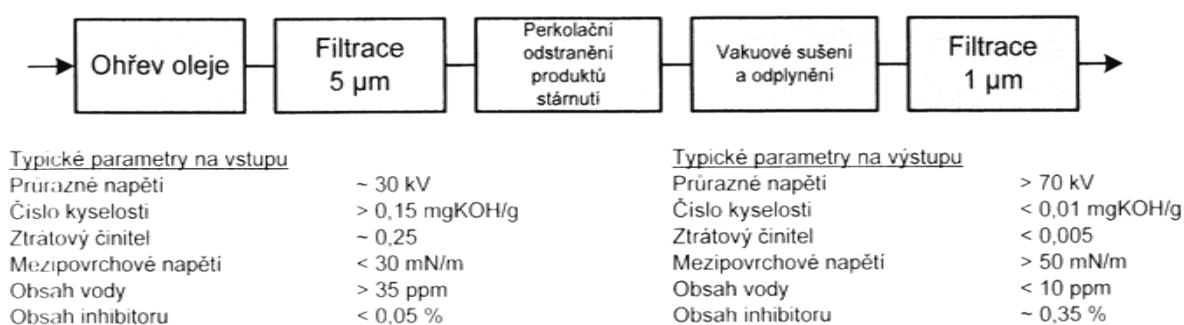
V prvním případě musíme brát v úvahu rizikovou manipulaci při dodávce regenerovaného a odvozu použitého oleje. Ještě zásadnější nevýhoda je znečištění vinutí, které přetrvává i po výměně oleje. Ve druhém případě se musí regenerace provádět do té doby, dokud olej nemá vyhovující parametry, které se blíží parametrům nového oleje. Doba, po kterou se provádí regenerace, závisí především na stavu použitého původního oleje a na množství nečistot v transformátoru. Kvalita regenerovaného oleje v transformátoru je během regenerace měřena a kontrolována. Za provozu lze filtrovat nebo vysoušet olej u transformátorů jen do napětí 35 kV. Ukázka zařízení na regeneraci olejové náplně přímo u transformátoru je na obr. 17. [5, 16, 28]

Bezpečnostní podmínky pro filtraci oleje za provozu [28]:

- musí být vydán příkaz „B“,
- je nutno zajistit prostor kolem filtrační stanice proti vstupu nepovolaných osob,
- filtrační zařízení musí být chráněno před nebezpečným dotykovým napětím,
- hadice pro připojení k olejovým výpustím nesmějí mít do délky 3 m od transformátoru kovový nebo jiný vodivý plášť,
- připojení a odpojení filtračního zařízení lze uskutečnit pouze za vypnutého a zajištěného stavu.



obr. 17 Zařízení na regeneraci transformátorového oleje.



obr. 18 Regenerace oleje s typickými parametry oleje na vstupu a výstupu [4,8].

2.1.8 Vizuální kontrola transformátoru

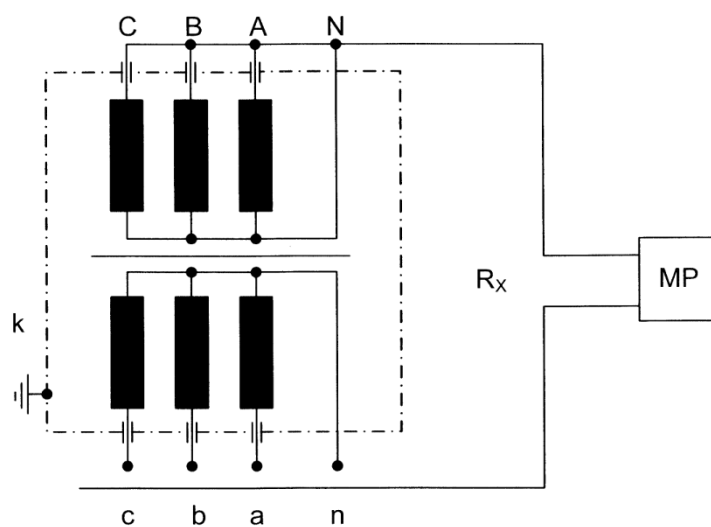
Velmi jednoduchá, ale zároveň důležitá zkouška, která umožňuje sledovat stav transformátoru z pohledu viditelných závad a defektů, jako jsou:

- netěsnosti na plášti transformátoru,
- viditelné poškození průchodek,
- povrchové poškození pláště,
- povrchové nečistoty, koroze.

2.1.9 Měření poměru kapacit C_2/C_{50}

Metoda měření poměru kapacit C_2/C_{50} vychází ze závislosti relativní permitivity na frekvenci, kde kapacita suché izolace je v závislosti na frekvenci téměř konstantní. Jakmile je vinutí navlhle, změní se jeho chování do té míry, že se kapacity měřené při frekvenci 2 a 50 Hz značně liší a to tím způsobem, že u zvlhlé izolace se kapacita zmenšuje s rostoucí frekvencí. [1, 2, 13, 15]

Veličinu, která je charakteristická pro poměr C_2 , C_{50} lze získat z hodnot $C_2 - C_{50}$ a C_{50} , které získáme měřením při napětí 100 V a frekvencemi 2 a 50 Hz. Tuto metodu lze použít pro všechny typy olejových transformátorů a tlumivek od jmenovitého napětí 1 kV. Zapojení je na obr. 19. [12, 13]



- MP – měřicí přístroj
 R_x – svorky přístroje
 k – kostra stroje
 N, n – vývod nulové svorky
 A, B, C – vývody strany vyššího napětí
 a, b, c – vývody strany nižšího napětí

obr. 19 Zapojení při měření kapacit transformátoru [15].



obr. 20 Měřič kapacit Presco AG TG-1MOD.

Stanovení hodnoty $C_2 - C_{50}$ a měření C_{50} na dvou a trojvinut'ovém transformátoru:

Přívod svorek C_x měřicího přístroje připojíme na vinutí vyššího napětí (VN), druhý přívod připojíme na kostru spojenou s vinutím nižšího napětí (NN), popřípadě středního napětí (SN). Pak měřicí přístroj přepneme do polohy C_{50} a vinutí VN nabíjíme nejméně 1 minutu, pak odečteme ustálenou hodnotu. Poté všechna vinutí spojíme s kostrou stroje a vybíjíme nejméně 1 minutu. Následně měřicí přístroj přepneme do polohy $C_2 - C_{50}$ a vinutí se opět nechá nabíjet po dobu jedné minuty. Odečteme ustálenou hodnotu a po odečtení spojíme všechna vinutí s kostrou a 3 minuty necháme vybíjet. Je třeba pamatovat na to, aby vybíjení po dobu 3 minut se provádělo vždy před každým měřením v dalším zapojení. Ukázka měřiče kapacit je na obr. 20.

[1, 12,14]

Poměr kapacit určíme z následujícího vztahu [2]:

$$C_2 / C_{50} = \frac{C_2 - C_{50}}{C_{50}} + 1 \quad (-) \quad (2.30)$$

Po přepojení na vinutí nn postupujeme stejným způsobem, taktéž je-li transformátor trojvinut'ový.

Zapojení dvou a trojvinut'ových transformátorů plyne z následující tab. 3:

tab. 3 Zapojení vinutí při měření kapacit vinutí [1, 2]

Transformátory s dvojitým vinutím Autotransformátory s trojitým vinutím		Transformátor s trojitým vinutím	
měřené vinutí	uzemněno	měřené vinutí	uzemněno
VN	NN, k	VN	SN, NN, k
NN	VN, k	SN	VN, NN, k
VN – NN	k	NN	VN, SN, k
		VN – SN	NN, k
		VN – SN – NN	k

Zjištěné hodnoty C_2/C_{50} porovnáváme s mezními hodnotami uvedenými v tab. 4, které jsou mezními nejvyššími dovolenými hodnotami pro izolační systém stroje. Pro vlhkou izolaci jsou charakteristické vyšší hodnoty.

tab. 4 Mezní hodnoty poměru C_2/C_{50} [1,5]

Teplota vinutí	10	20	30	40	50
Poměr C_2/C_{50} [-]	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

2. 1. 10 Infračervená termografie

Systém infračervené termografie umožňuje bezkontaktně měřit dynamické teplotní pole. Rozložení a průběh teploty se zobrazuje a zaznamenává prostřednictvím infračervené kamery. Tyto systémy mají široké uplatnění včetně elektrotechniky. Měření povrchové teploty tělesa na celém povrchu současně a zobrazení takového teplotního pole se uplatní [21]:

- při diagnostice provozu strojů a elektrických zařízení,
- při požární prevenci,
- při plánování pravidelných odstávek a oprav energetických zařízení.

Použití v elektrotechnice

Infračervená termografie je nástroj pro identifikaci problémových oblastí při výrobě, přenosu a distribuci elektrické energie. Toto měření umožňuje on-line kontroly elektrických zařízení, protože se kontrola uskutečňuje během provozu pod zatížením, bez ovlivnění měřeného zařízení a bez nutnosti odstávek dodávky nebo odběru elektrické energie. Infračervená termografie je bezkontaktní a nedestruktivní metoda. [14, 21]

Při preventivních kontrolách jsou případné závady objevovány již v počátečním stádiu, což má vliv na ekonomiku provozu – infračervená kamera je schopna detekovat místo pravděpodobné poruchy v elektrických zařízeních a tedy umožňuje provést případný zásah při pravidelných odstávkách zařízení. Týká se to především měření kontaktů, průchodek, jistících prvků apod. U transformátorů je situace trochu jiná. Infračervená kamera detektuje zvýšenou teplotu na povrchu nádoby transformátoru ve chvíli, kdy už může docházet k vypnutí ochrany zařízení a to z důvodu pomalého přenosu zvýšené teploty vinutí, potažmo izolačního systému na povrch nádoby. Proto se v případě diagnostiky transformátoru používá Infračervená termografie jako doplňující metoda. Příklad přístroje používaný v infračervené termografii je na obr. 21. [14, 21, 27]

Termovizní měření umožňuje kontrolu [21]:

- pásových a kabelových vedení elektrické energie,
- rozvaděčů a elektrických systémů,
- zařízení MaR,
- rozvoden nn, vn a vvn,
- transformátorů a výzbroje transformátorových stanic.



obr. 21 Infračervená kamera Testo 870-1.

2.2 On – line diagnostika

On-line provozní systémy vyhodnocují technický stav zařízení za jeho provozu a využívají k tomu funkční diagnostiky. Funkční diagnostika vychází pro stanovení diagnózy z provozních signálů. On-line systémy, které jsou trvale připojeny k diagnostikovanému objektu, nazýváme monitorovací systémy. Monitorování je trvalé sledování stavu objektu s průběžným vyhodnocováním stavů objektu. Výhodou tohoto systému je nepřetržité sledování stavu zařízení, které pak umožňuje rychlou reakci na změny sledovaných parametrů. [12, 19]

Monitorovací systém

Monitorovací systém je určen k preventivnímu a nepřerušovanému sběru dat. Tyto data je pak nutno komplexně vyhodnocovat. Jde o zkoušky aplikované na zkoušeném zařízení s cílem odhalit slabá místa v izolační soustavě a stanovovat stupně postupného znehodnocování této soustavy jako celku. Monitorovací zařízení za provozu podporuje možnost případných údržbových prací, která by umožnila přechod od periodicky prováděné údržby na údržbu prováděnou na základě vyhodnocování stavu zařízení. [12, 19]

Monitorovací systém by měl plnit následující funkce:

- nepřetržité provozní sledování diagnostických veličin,
- soupis hlášení alarmů překročení nastavených mezních hodnot, popřípadě přímé zásahy do řídicího systému zařízení,
- stanovení aktuálního stavu zařízení (okamžité vyhodnocování měřených veličin).

Velmi komplikované je měření diagnostikovaných veličin za plného provozu stroje a to jednak z nutnosti zachování bezpečnosti při měření, ale i z nutnosti eliminace rušivých signálů, které běžný provoz transformátoru doprovázejí. Monitorovací systémy by měly splňovat požadavky spolehlivosti, jednoduchosti a cenové dostupnosti. [19]

Volba parametrů pro sledování zařízení

Základním indikátorem, který má značný vliv na bezporuchový chod transformátoru je stav izolačního systému olej-papír. Je to kombinované působení jednotlivých vlivů na organické materiály, které se mohou navzájem ovlivňovat. Mezi hlavní provozní vlivy patří mechanické namáhání (otřesy, vibrace), vliv klimatu, chemické vlivy (koroze, oxidace), záření, působení teploty (rychlé změny) a elektrické pole (náhlé změny intenzity pole, výbojová činnost). Pro volbu parametrů je důležitá jejich vypovídající schopnost měřitelnosti daného parametru a celkové náklady na systém. [19]

Velké procento závad se vyskytuje v aktivní části (vinutí a magnetický obvod) a v izolačním systému.

Nejdůležitější parametry indikující stav vinutí a hlavní izolace jsou [15]:

- plyny rozpuštěné v oleji,
- přítomnost kyslíku,
- obsah vlhkosti,
- teplota.

K rozkladu minerálního oleje a celulózového papíru přispívají uvedení činitelů, ale za hlavní parametr pro zatěžování transformátoru je teplota.

Pro sledování stárnutí transformátoru a určení zbytkové životnosti byly navrženy následující parametry [6, 19]:

- snímání výstupního napětí a proudu pro každou fázi,
- snímání teploty oleje v horní části transformátoru,
- snímání teploty na vstupu a výstupu z chladiče,
- sledování obsahu plynů v oleji,
- sledování obsahu vlhkosti v oleji.

Měření základních provozních veličin (napětí a proud)

Z měření provozních napětí a proudů získáváme veličiny potřebné pro stanovení okamžitého zatížení transformátoru. Na hodnotě zatěžovacího proudu závisí velikost Joulových ztrát ve vinutí. Tyto odhadují velikost tepelného zatížení izolačního systému transformátoru. Měření proudů a napětí jednotlivých fází se provádí pomocí měřících transformátorů. [6, 12, 15]

Měření teplot

Elektrická energie ztracená v transformátoru se přeměňuje v teplo ve vinutí, v magnetickém obvodu a jiných částech transformátoru a proto se klade velký důraz na teplotní čidla. Velké tepelné namáhání nepříznivě ovlivňuje stav izolačního systému olej – papír.

Teploty sledované u transformátoru: teplota okolí, teplota oleje v horní části transformátoru, teplota vinutí, rozložení teplot a stav chlazení. [6, 12, 15]

Měření výšky hladiny v dilatační nádobě

Výšku hladiny oleje měříme pomocí obtokových stavoznaků, které bývají k nádobě s kapalinou připevněny z boční strany pomocí přírub. Kapalina v plovákové komoře je ve stejné výšce jako nádoba a určuje polohu plováku v tělese stavoznaku. Výška hladiny je zobrazena magnetickou zobrazovací lištou, kterou tvoří sloupec magnetických válečků. Změna indikace výšky hladiny je způsobena magnetickým polem permanentního magnetu umístěného v plováku. [6, 12, 15]

Stanovení obsahu plynů v oleji

Plyny, které mají nežádoucí vliv na chod zařízení, a u kterých hlídáme příslušné hodnoty koncentrací: vodík (H_2), oxid uhelnatý (CO), metan (CH_4), etan (C_2H_6), etylen (C_2H_4), acetylen (C_2H_2) a poměry plynů acetylen / etylen, etylen / etan, metan / vodík, etan / metan, oxid uhličitý (CO_2) / oxid uhelnatý, dusík (N) / kyslík O_2 . [6, 15]

Rozklad oleje, celulózové izolace a jiné chemické procesy mají za následek vytváření plynů v oleji. Rozklad minerálního izolačního oleje vzniká mícháním různých druhů molekul uhlovodíků obsahujících chemické skupiny CH_3 , CH_2 a CH , které jsou vzájemně propojené pomocí chemických vazeb mezi uhlíkovými atomy. Rozštěpení některých chemických vazeb mezi uhlíkem a vodíkem nebo mezi dvěma vodíky může nastat z důvodu elektrických nebo teplotních poruch. To má za následek vytvoření menších nestabilních fragmentů v radikálové nebo iontové formě, jako jsou například H^+ , CH_3 , CH_2^+ nebo C^- (kromě celé řady jiných komplexních forem). Tyto fragmenty se mohou velmi rychle opět slučovat pomocí komplexních reakcí do formy molekul plynů, jako je například vodík (H-H), metan (CH_3-H), etan (CH_3-CH_3), etylén ($CH_2=CH_2$) nebo acetylén ($CH\equiv CH$). Uhlovodíkové plyny C_3 a C_4 , stejně tak jako pevné částice uhlíku a uhlovodíkových polymerů (X vosk) jsou dalšími možnými produkty těchto rekombinací. Vytvořené plyny se rozpouštějí v oleji nebo

se akumulují jako volné plyny, pokud jejich vznik probíhá velmi rychle a ve velkém množství lze je tudíž analyzovat pomocí metody DGA (adsorpční kapalinová chromatografie). [6, 15]

Plyny mohou vznikat nejenom jako produkty poruchy nebo závady zařízení, ale také pomocí koroze nebo jiných chemických reakcí zahrnujících ocel, nebarvené povrchy nebo ochranné nátěry.

[15]

Stanovení obsahu vlhkosti v oleji

Působením vlhkosti se elektrické vlastnosti většiny pevných i kapalných izolantů zhoršují. Při styku pevné látky s vlhkostí nastávají dva děje: adsorpce vody na povrchu a absorpce vody do objemu látky. Voda se do izolačního oleje dostává převážně z ovzduší nebo vzniká jako produkt oxidačního stárnutí. [13, 14]

Přítomnost vlhkosti v izolačním systému zhoršuje dielektrické vlastnosti izolačního oleje a to hlavně jeho elektrickou pevnost. Při odběru vzorku oleje se dá posoudit i možné navlhnutí pevné izolace. V provozu vlivem kolísání teplot dochází k neustálému přestupu vody mezi pevnou a kapalnou částí. Voda se v oleji může vyskytovat v několika formách jako volná, rozpuštěná, emulgovaná a reakční. [13, 14]

Použití software

Nejdůležitějším článkem metod je softwarové zpracování měření. Aplikace pro provozní sledování vybraných parametrů je ve výsledné podobě počítačový program. Pro návrh programového řešení je nutno v první řadě vybrat vhodný software. Vzhledem k tomu, že se celé měření provádí při provozu, neměl by tedy chybět v software graf a možnosti výpočtu doplňkových hodnot podle matematických modelů. Pro rychlá a časově náročná měření je nezbytné použití výkonnějších procesorů a sběrnic, větší operační paměti a prostoru na disku pro rychlé ukládání datových souborů. Z důvodu spolehlivosti celého systému je dobré použít průmyslovou verzi PC. Daný typ závisí na požadavcích a potřebách uživatele a počtu snímaných veličin. [13]

On-line monitorovací systém MS 3000

Tento monitorovací systém od firmy Alstom je schopen sledovat všechny hlavní části transformátoru s korelací analyzovaných nashromážděných dat i pro více transformátorů současně.

Do softwaru jsou implementovány algoritmy pro on-line analýzu získaných dat. Tento sofistikovaný nástroj zdůrazňuje schopnosti, které by měl nejmodernější monitorovací systém mít. Software expertního systému vám poskytuje doporučení a informace týkající se provozu a servisu/údržby transformátoru. [24]

Sofistikované vytváření modelů [24]:

- Tepelný model.
- Model stárnutí.
- Model přepínače odboček.
- Model vlhkosti.
- Model průchodek.
- Model přetížení.
- Model chlazení.

Systém umožňuje přímočaré zasílání zpráv s výstrahami, varováními a diagnostikou. Nabízí jak rychlý přehled o klíčových datech, tak i hluboký pohled dovnitř transformátoru. [24]

Konfigurovatelný generátor sestav vytváří automaticky záznamy s informacemi o stavu transformátoru a hlavních součástí. Tento protokol může být vytvořen na základě příkazu nebo může být vytvářen pravidelně. [24]

Vestavěný modul simulátoru umožňuje uživateli simulovat vnější události nebo události v transformátoru, případně předvídat další a tím studovat chování transformátoru. Simulátor lze také používat pro školení provozní obsluhy. Příklad monitorování systému MS 3000 je na obr. 22. [24]

Měřené a analyzované veličiny standardního systému MS 3000 [24]:

Aktivní část:

- zdánlivý výkon a součinitel zatížení,
- teplota oleje,
- teplota v ohnisku,
- obsah plynů v oleji,
- obsah vlhkosti v oleji,
- vlhkost papíru,
- teplota tvoření bublin a bezpečnostní rezerva,
- rychlost stárnutí a využití životnosti,
- průrazné napětí,
- skutečné ztráty,
- přetížitelnost,
- doba nouzového přetížení.

Průchodky:

- provozní napětí,
- přepětí,
- změna kapacitance, on-line kapacitance,
- bezdotykové kapacitní proudy,
- zatěžovací proudy,
- nadproudové a zkratové proudy.

Přepínač odboček:

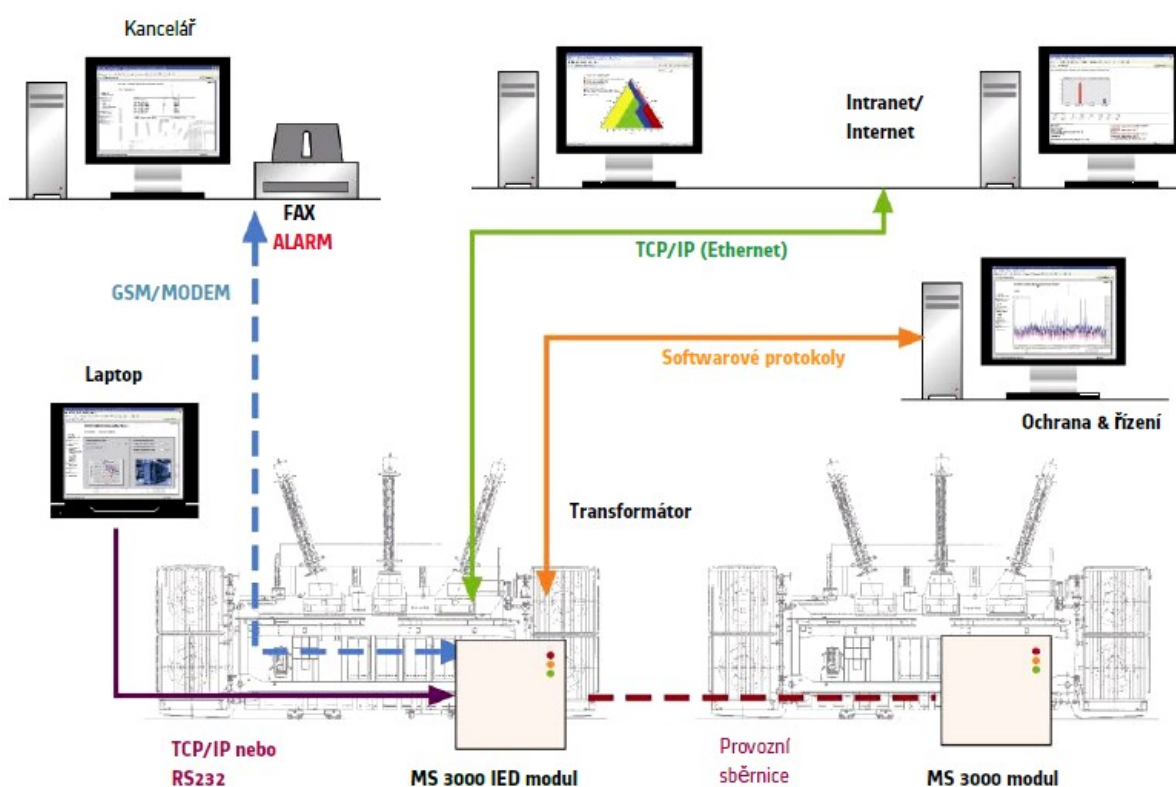
- poloha přepínače odboček pod zatížením,
- počet spínacích operací,
- součet sepnutých zatěžovacích proudů,
- příkon motoru pohonu,
- posouzení mechanických vlastností,
- opotřebení kontaktů,
- teplota oleje v přepínači odboček,
- rozdíl v teplotách nádoby OLCT.

Chlazení:

- provozní stav ventilátorů a čerpadel,
- doba provozu ventilátorů a čerpadel,
- účinnost chlazení (R_{th}),
- okolní teplota.

Další funkce a měření [24]:

Měření v ohnisku pomocí optických vláken, částečný výboj, účinník průchodek ($\tan \delta$), účinník transformátoru ($\cos \phi$), účinnost transformátoru, teplota oleje ve spodní části, teplota monitorovacího modulu, vlhkost oleje v OLTC, množství plynu a rychlost Buchholzova relé, tlak oleje a rozdíly v tlaku oleje, zrychlení (stěna nádoby, OLTC), hladina oleje, vlhkost vzduchu uvnitř expanzní nádoby, tlak vzduchu, chladicí výkon, teploty na přívodu a vývodu chladicího zařízení, rozdíly mezi teplotami na přívodu a vývodu, AVR, řízení chladicího zařízení, digitální stavové informace, atd.



obr. 22 Síťová architektura monitorovacího systému MS 3000 [24].

3. Aplikace diagnostických metod na vybraném stroji

3.1 Technická diagnostika stavu výkonového transformátoru

3.1.1 Zadání

Úkolem je provést technickou diagnostiku stavu výkonového transformátoru: 22/6 kV; 6,3 MV·A; typ: ERH 6577/61. Cílem této diagnostiky je posoudit další bezpečné a spolehlivé provozování tohoto transformátoru.

Pro určení stavu výkonového transformátoru se bude vycházet z těchto diagnostických měření:

- vizuální kontrola transformátoru
- měření ztrát naprázdno,
- měření ztrátového činitele,
- zkouška rázovou vlnou,
- měření izolačního odporu vinutí,
- diagnostika olejů,
- infračervená termografie.

Každá z těchto metod je určena pro identifikaci poruch určitého charakteru.

3.1.2 Parametry diagnostikovaného zařízení

Transformátor:

Výrobce Škoda Plzeň
Typ: ERH 6577/61
V. Č. 937838
ČSN 351000
Rok výroby: 1972
Váha oleje: 7 t
Váha celkem: 25 t
Zapojení: Yd1 S1
Jmenovitý výkon: 6,3 MV·A
Primární napětí: 22 kV
 I_1 : 165 A
 u_k : 6,9 %
 U_2 : 6,3 kV
 I_2 : 577 A
Chlazení: ONAN

3.1.3 Vizuální kontrola transformátoru

Před samotným měřením elektrických veličin byl transformátor zkontrolován vizuálně, kdy touto kontrolou byla zjištěna netěsnost v oblasti průchodek na straně 6 kV transformátoru. Netěsnost jedné z průchodek je zobrazena na obr. 23.



obr. 23 Netěsnost v oblasti průchodek na straně 6 kV transformátoru.

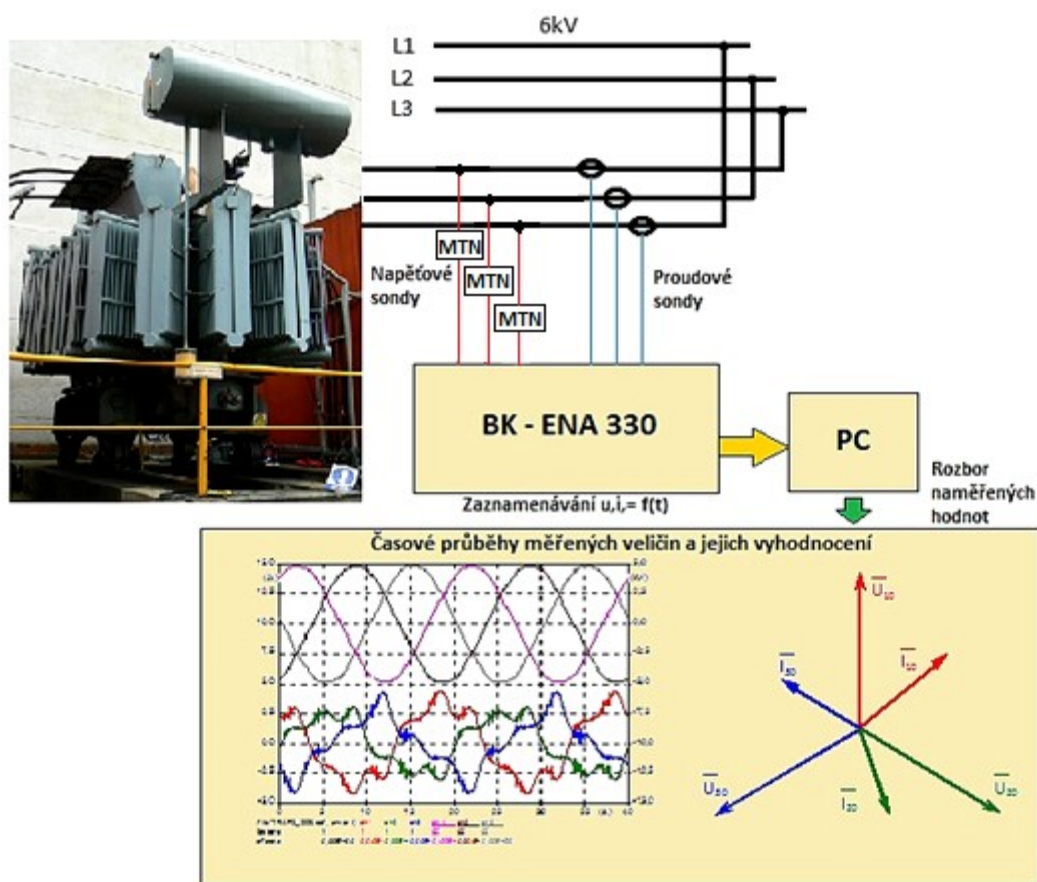
3.1.4 Aplikace diagnostické metody – měření transformátoru naprázdno

Náplní diagnostického měření transformátoru naprázdno bylo určení těchto veličin:

- proudů jednotlivých vinutí naprázdno,
- ztrát naprázdno,
- účinníku naprázdno.

Výše uvedené veličiny byly určeny z měření na straně 6 kV diagnostikovaného transformátoru, kdy fázové napětí napájecí přípojnice bylo měřeno prostřednictvím MTN 6/0,1 kV a proud naprázdno byl měřen pomocí Rogovského cívek. Tyto cívky byly umístěny na přívodním kabelovém vedení měřeného transformátoru. Směr napájení byl ze strany 6 kV. Přehledové schéma zapojení techniky pro měření je na obr. 24.

Technické prostředky použité při měření: power network analyzer BK - ENA 330



obr. 24 Přehledové schéma zapojení měřicí aparatury ve stavu transformátoru naprázdno.

Všechny hodnoty byly určeny z naměřených okamžitých průběhů napětí a proudů, viz obr. 25 a to pomocí vzorců pro střídavé periodické neharmonické průběhy napětí a proudů.

Byly vypočteny efektivní hodnoty napětí, proudů; dále činný výkon, zdánlivý výkon, činitel výkonu a součet okamžitých hodnot proudů. Celkové vyhodnocení okamžitých hodnot transformátoru ve stavu naprázdno vidíme v tabulce 5.

Pozn.: Efektivní hodnoty a výkony byly vyhodnoceny pro deset period signálů

Efektivní hodnota napětí

$$U_i = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot T} \cdot \int_0^{10 \cdot T} u_i^2(t) \cdot dt} \quad (V) \quad (3.1)$$

Efektivní hodnota proudu

$$I_i = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot T} \cdot \int_0^{10 \cdot T} i_i^2(t) \cdot dt} \quad (A) \quad (3.2)$$

Střední hodnota proudů naprázdno

$$I_0 = (I_1 + I_2 + I_3)/3 \quad (A) \quad (3.3)$$

Zdánlivý výkon

$$S = U \cdot I \quad (V \cdot A) \quad (3.4)$$

$$S_C = S_1 + S_2 + S_3 \quad (V \cdot A) \quad (3.5)$$

Činný výkon

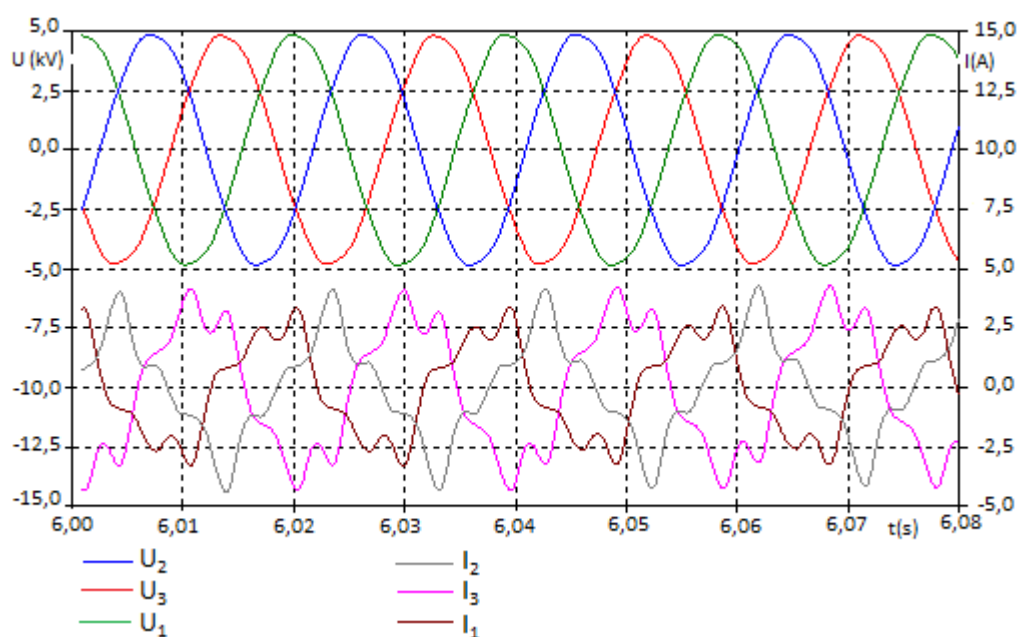
$$P = \frac{(u, i)}{T} = \frac{1}{10 \cdot T} \cdot \int_0^{10T} u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (W) \quad (3.6)$$

$$P_C = P_1 + P_2 + P_3 \quad (W) \quad (3.7)$$

Skutečný účinník

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (-) \quad (3.8)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.9)$$



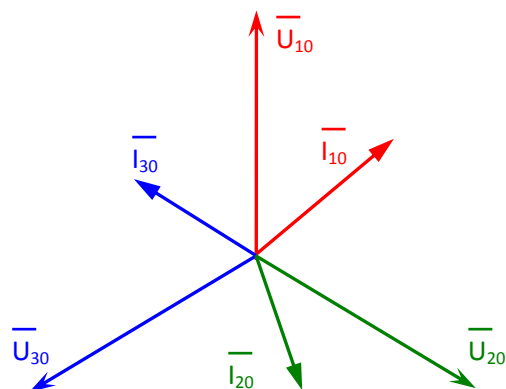
obr. 25 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_1 , U_2 , U_3 (kV) a proudů transformátorem I_1 , I_2 , I_3 (A) ve stavu naprázdno.

tab. 5 Vyhodnocení okamžitých hodnot transformátoru ve stavu naprázdno

U_{10f} (V)	U_{20f} (V)	U_{30f} (V)	U_{0f} (V)	I_{01} (A)	I_{02} (A)	I_{03} (A)	I_0 (A)
3531,45	3357,21	3422,32	3442,9	2,50136	1,88685	2,1728	2,42034
λ_{01} (-)	λ_{02} (-)	λ_{03} (-)	λ_0 (-)	S_{01} (V·A)	S_{02} (V·A)	S_3 (V·A)	S (V·A)
0,548	0,65	0,456	0,78	8724,43	6748,95	7142,97	25351,2
P_{01} (W)	P_{02} (W)	P_{03} (W)	P_0 (W)	Q_{01} (var)	Q_{02} (var)	Q_{03} (var)	Q_0 (var)
5759,01	5523,15	3589,35	12259,5	6795,73	4143,38	6322,27	16644,13
ΔP_{0N} (W)		$\Delta(1-P_0/P_{0N})$ (%)					
9010		56,8					

Kde:

$U_{10f}, U_{20f}, U_{30f}$	fázové napětí naprázdno,
I_{01}, I_{02}, I_{03}	proudy vinutím transformátoru naprázdno,
$\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03}$	činitel výkonu (skutečný účinník) naprázdno,
S_{01}, S_{02}, S_{03}	zdánlivý výkon naprázdno,
P_{01}, P_{02}, P_{03}	činný výkon naprázdno,
Q_{01}, Q_{02}, Q_{03}	jalový výkon naprázdno,
ΔP_{0N}	jmenovité ztráty naprázdno.



obr. 26 Fázorové znázornění napětí a proudů transformátoru ve stavu naprázdno.

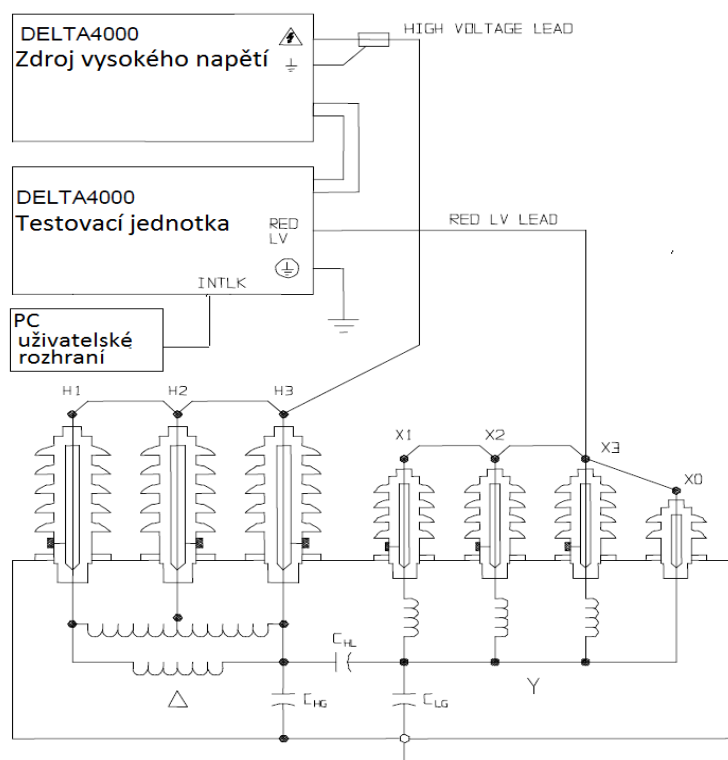
3.1.5 Aplikace diagnostické metody – měření ztrátového činitele

Bylo provedeno měření ztrátového činitele pomocí měřicí aparatury. Na základě tohoto měření byl určen stav izolačního systému. Blokové schéma měřicí aparatury je na obr. 27 a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.

Výsledné grafické zobrazení napěťové závislosti ztrátového činitele je na obr. 28.

Technické prostředky použité při měření:

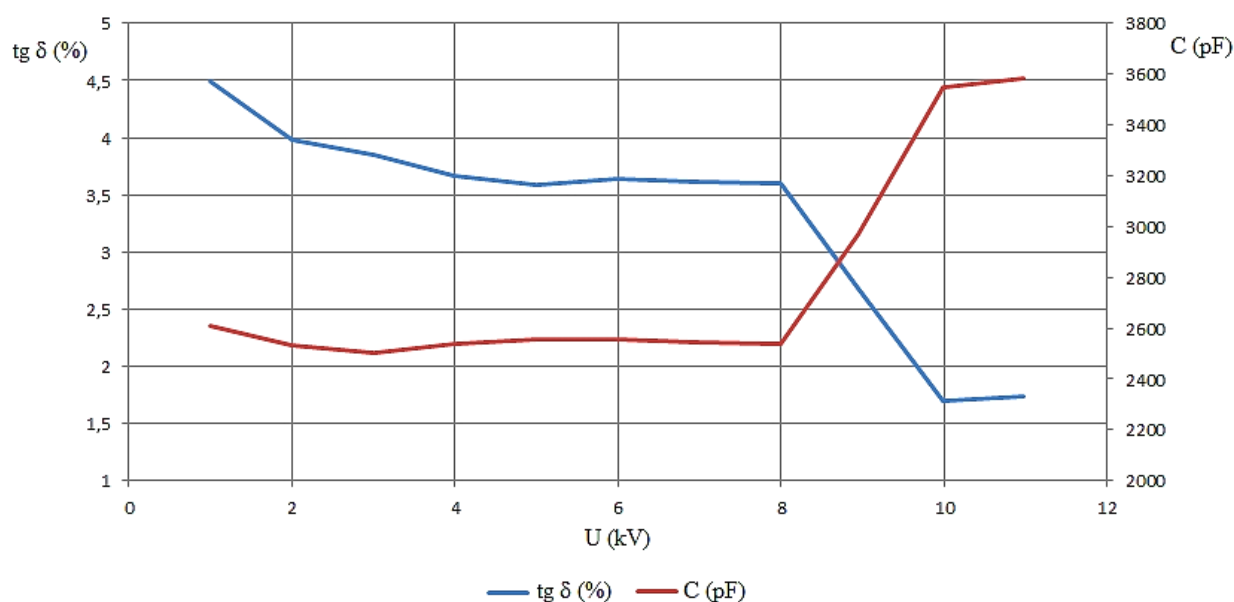
Delta 4000, 12kV diagnostická jednotka izolace, v.č. 1108 1011



obr. 27 Blokové schéma zapojení měřicí aparatury.

tab. 6 Naměřené hodnoty ztrátového činitele

Čas měření	č. měření	T (°C)	f (Hz)	U (kV)	I (mA)	C (pF)	tg δ (%)	P (W)	Činitel napěťové závislosti (%)
11:02:24	1	18	50	1,00219	0,822534	2611,58	4,49166	0,036928	0,879052
11:02:37	2	18	50	2,00182	1,59137	2531,92	3,97553	0,126846	0,501328
11:02:48	3	18	50	3,00313	2,36266	2502,06	3,85438	0,273238	0,516537
11:02:59	4	18	50	3,99792	3,18841	2535,82	3,67056	0,467766	0,331955
11:03:18	5	18	50	4,99967	4,02321	2558,59	3,58289	0,720532	0,217836
11:03:29	6	18	50	5,99383	4,81754	2556,39	3,63373	1,04928	0,129234
11:03:43	7	18	50	6,99881	5,60164	2546,23	3,61759	1,41865	0,125665
11:03:59	8	18	50	7,99515	6,37866	2536,13	3,59537	1,83077	0,151030
11:04:24	9	18	50	8,94401	8,47135	2966,58	2,68835	1,86255	0,188122
11:04:49	10	18	50	9,9882	11,1349	3548,94	1,69853	1,88063	0,232716



obr. 28 Napěťová závislost ztrátového činitele a kapacity vinutí transformátoru.

tab. 7 Typické hodnoty ztrátového činitele [3]

Typ zařízení	tg δ (%) při 20 °C
Olejový transformátor:	
Nový, vysokonapěťový (115 kV a více)	0,25 - 1
15 let, vysokonapěťový	0,25
Nízkonapěťový, distribuční	0,3
Olejový vypínač	0,5 - 2
Kabely s olejem impregnovanou izolací, nové (více než 27,5 kV)	0,5 - 1,5
Kabely s olejem impregnovanou izolací, vysokonapěťové, impregnované pod tlakem	0,2- 0,5
Statorové vinutí točivých strojů, 2,3 - 13,8 kV	2,0 - 8,0
Kondenzátory (bez vybíjecích odporů)	0,2 - 0,5
Průchodky:	
Suché	3,0 - 10,0
Plněné sloučeninou, do 15 kV	5,0 - 10,0
Plněné sloučeninou, 15 - 46 kV	2,0 - 5
Plněné olejem, do 110 kV	1,5 - 4
Plněné olejem, nad 110 kV	0,25

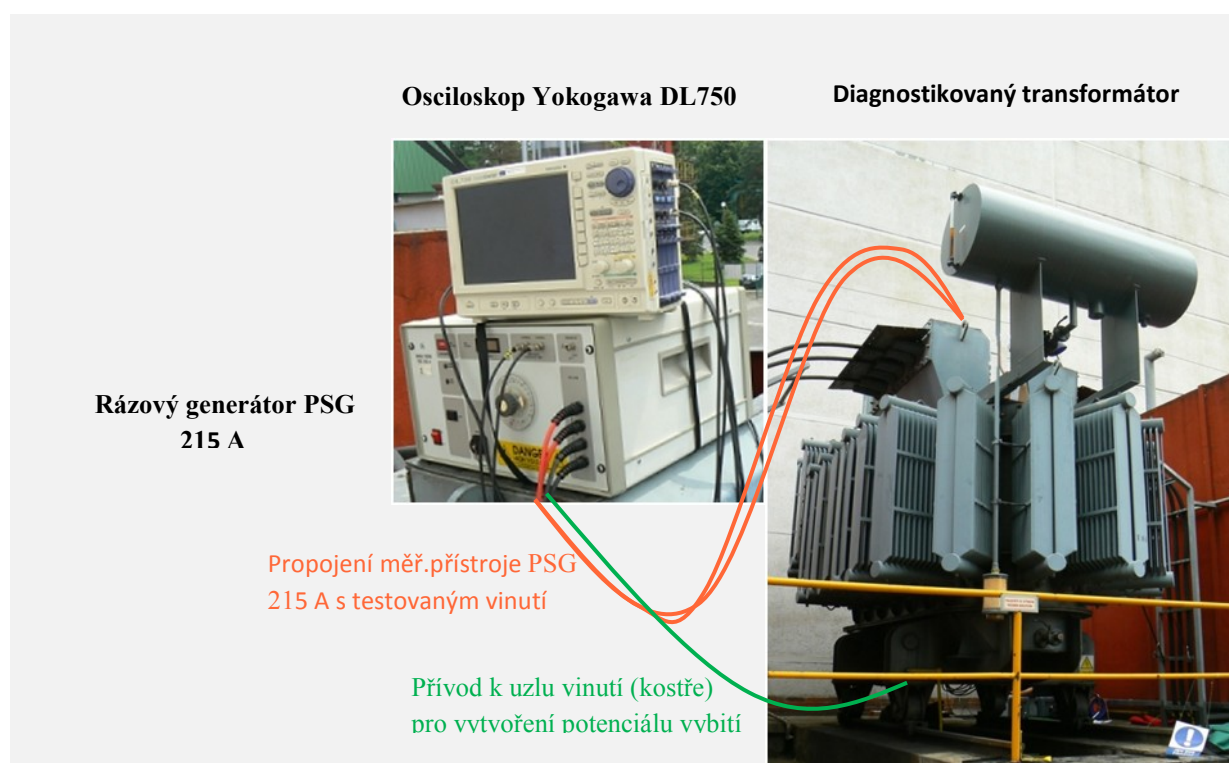
tab. 8 Hodnoty ztrátového činitele dle IEEE 62-1995.

Typ zařízení	Nové	Starší	Limitní (varovná) hodnota
Výkonové transformátory, olejové	0,2 - 0,4 %	0,3 - 0,5 %	>0,5 %
Průchodky	0,2 - 0,3 %	0,3 - 0,5 %	>0,5 %

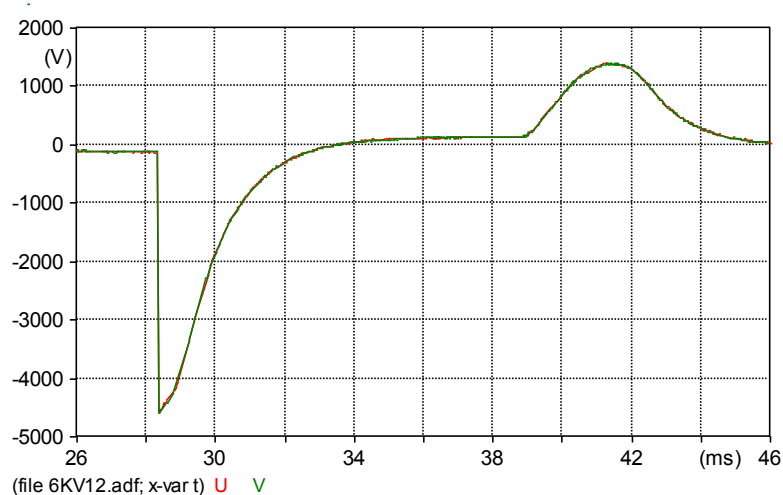
3.1.6 Aplikace diagnostické metody – impulsní srovnávací zkouška

Měření diagnostickou metodou „impulsní srovnávací zkouška“ proběhlo tak, že nejdříve byly měřeny odezvy na rázové namáhání na straně 22 kV a poté na straně 6 kV, a to vždy pro jednotlivé dvojice vinutí. Pro určení difference odezev bylo použito integrální kritérium. Příklady odezvy na impulsní vlnu při testování izolačního stavu transformátoru na straně 6 kV a 22 kV mezi dvojicí vinutí U a V jsou na obr. 30, 31. Výsledky hodnocení jednotlivých měření transformátoru jsou v tab. 9. Přehledové blokové schéma zapojení měřících přístrojů je uvedeno na obr. 29.

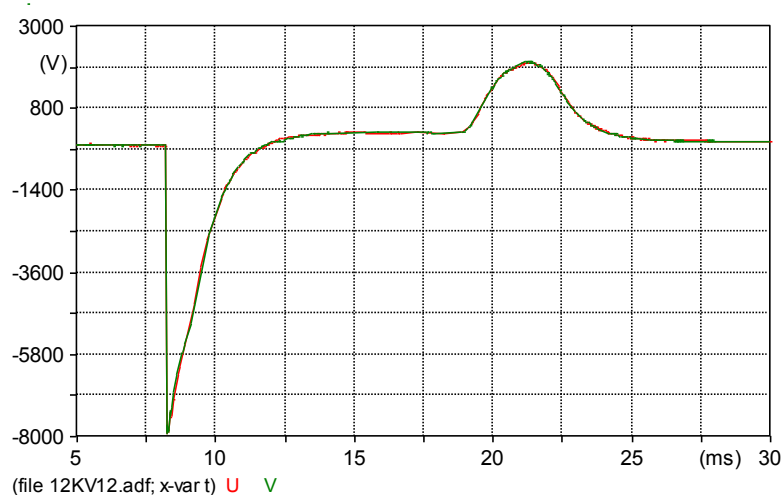
Zdroj impulsní vlny: rázový generátor PSG 215A, (SURGE TESTER), v. č. 3151E-09.



obr. 29 Přehledové schéma zapojení měřícího pracoviště při impulsní zkoušce.



obr. 30 Průběh rázové vlny pro dvojici vinutí, experimentální měření, průběh odezvy napětí fáze U a V (V), měření na straně 6kV transformátoru.



obr. 31 Průběh rázové vlny pro dvojici vinutí, experimentální měření, průběh odezvy napětí fáze U a V (V), měření na straně 22kV transformátoru.

tab. 9 Výsledky vyhodnocení odezvy impulsní vlny dle integrálního kritéria pro měřený transformátor

Napětí (kV)	Vinutí	$ A_1 - A_2 $ (V)
6	U-V	1,259
	V-W	1,454
	U-W	1,405
22	U-V	0,124
	V-W	2,489
	U-W	4,343

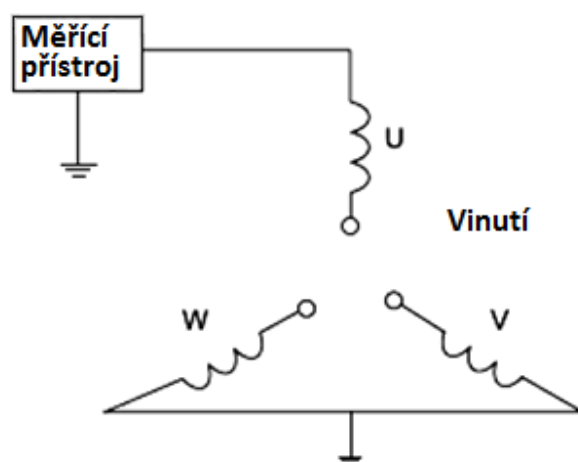
3.1.7 Aplikace diagnostické metody – měření izolačního odporu vinutí

Pro posouzení stavu celkového izolačního systému analyzovaného transformátoru byla použita zkouška měření zdánlivého izolačního odporu, indexu polarizace PI a koeficientu dielektrické absorpce DAR. Pro posouzení poškození jedné vrstvy dielektrika bylo dále měření doplněno o test vybíjení dielektrika DD. Měření bylo provedeno jak pro stranu 6 tak i 22 kV, přičemž výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 10, 11, 12, 13.

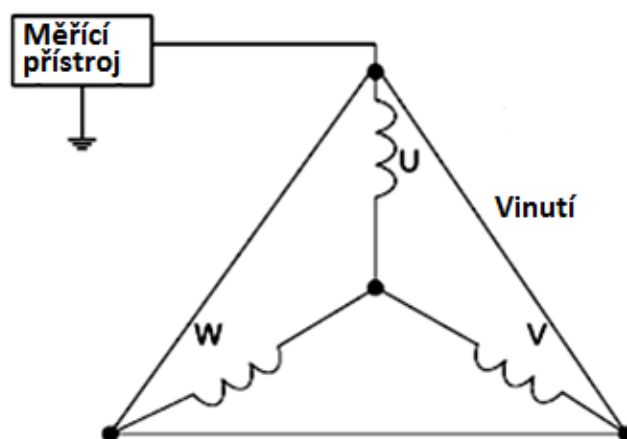
Technické prostředky použité při měření:

Měřič izolačních odporů C. A. 6545. SN: N173544GMH

Schéma zapojení:



obr. 32 Schéma zapojení pro měření izolačního odporu vinutí s rozpojeným uzlem.



obr. 33 Schéma zapojení pro měření izolačního odporu vinutí s nerozpojeným uzlem.

Naměřené hodnoty:

tab. 10 Izolační odpor strany 6 kV transformátoru

	U	V	W
<i>t</i> (s)	R_i (GΩ)	R_i (GΩ)	R_i (GΩ)
00:15	1,931	2,019	2,093
00:30	2,181	2,181	2,399
01:00	2,438	2,415	2,429
01:30	2,593	2,527	2,802
02:00	2,705	2,631	2,930
02:30	2,822	2,692	2,962
03:00	2,878	2,719	3,093
03:30	2,952	2,757	3,161
04:00	3,019	2,785	3,225
04:30	3,076	2,807	3,339
05:00	3,127	2,839	3,381
05:30	3,181	2,867	3,432
06:00	3,228	2,899	3,473
06:30	3,273	2,904	3,517
07:00	3,313	2,997	3,540
07:30	3,351	3,081	3,581
08:00	3,389	3,101	3,605
08:30	3,419	3,123	3,628
09:00	3,449	3,148	3,559
09:30	3,476	3,048	2,065
10:00	3,301	3,362	3,664

tab. 11 Charakteristické veličiny strany 6 kV transformátoru

Fáze	U	V	W	Hodnocení stavu
R_{10min} (GΩ)	3,301	3,362	3,664	
DAR	1,11	1,11	----	Nedostatečný nebo nebezpečný
PI	1,44	1,39	----	Nedostatečný nebo nebezpečný
DD	19,17	33,6	23,16	Velmi špatný
I (nA)	14,19	14,79	13,57	
C (μF)	0,005	0,005	0,005	

tab. 12 Izolační odpor strany 22 kV transformátoru

t (s)	R_t (G Ω)
00:15	1,929
00:30	2,315
01:00	2,802
01:30	3,157
02:00	3,423
02:30	3,526
03:00	3,816
03:30	3,964
04:00	4,08
04:30	4,2
05:00	4,31
05:30	4,4
06:00	4,49
06:30	4,57
07:00	4,64
07:30	4,7
08:00	4,75
08:30	4,8
09:00	4,86
09:30	4,91
10:00	4,96

tab. 13 Charakteristické veličiny strany 22 kV transformátoru

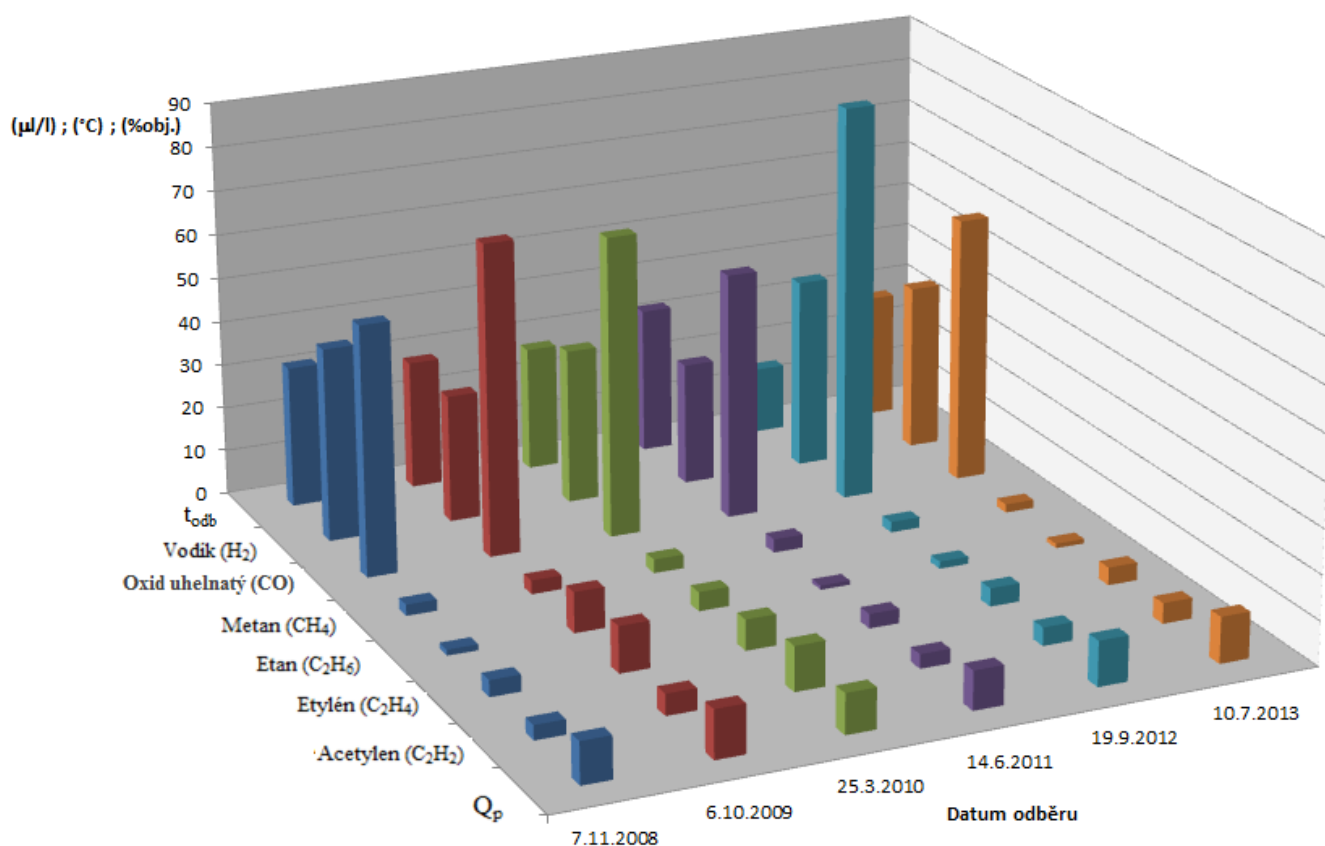
R_{10min} (GΩ)	4,96	Hodnocení stavu
DAR	1,22	Nedostatečný nebo nebezpečný
PI	1,78	Nedostatečný nebo nebezpečný
DD	16,75	Velmi špatný
I (nA)	511	
C (μF)	0,007	

3.1.8 Aplikace diagnostické metody – transformátorový olej

Metody analýzy: vakuová extrakce (1), statický HEADSPACE (2), dynamický HEADSPACE (3), částečná evakuace (4), přímý nástřik plynu (5).

tab. 14 Koncentrace jednotlivých plynů v transformátoru (v. č. 937838)

Datum odběru	Metoda	t_{odb}	Vodík	Oxid uhelnatý (CO)	Metan (CH ₄)
		(°C)	(μl/l)	(μl/l)	(μl/l)
7. 11. 2008	1	32,0	43,8	56,5	2,5
6. 10. 2009	1	29,0	28,8	70,5	3,1
25. 3. 2010	1	28,0	35,0	68,0	3,1
14. 6. 2011	1	33,0	27,6	55,6	3,0
19. 9. 2012	1	15,0	42,9	89,5	2,4
10. 7. 2013	1	28,0	37,5	60,3	1,9
Datum odběru	Etan (C ₂ H ₆)	Etylén (C ₂ H ₄)	Acetylen (C ₂ H ₂)	Q_p	Počet dní
	(μl/l)	(μl/l)	(μl/l)	(%obj.)	
7. 11. 2008	1,3	3,7	3,3	9,31	0
6. 10. 2009	9,1	10,4	4,8	10,75	333
25. 3. 2010	4,3	6,9	10,0	8,99	503
14. 6. 2011	0,9	3,2	3,2	8,67	949
19. 9. 2012	1,6	4,1	4,1	10,07	1412
10. 7. 2013	1,0	4,0	4,6	10,31	1706



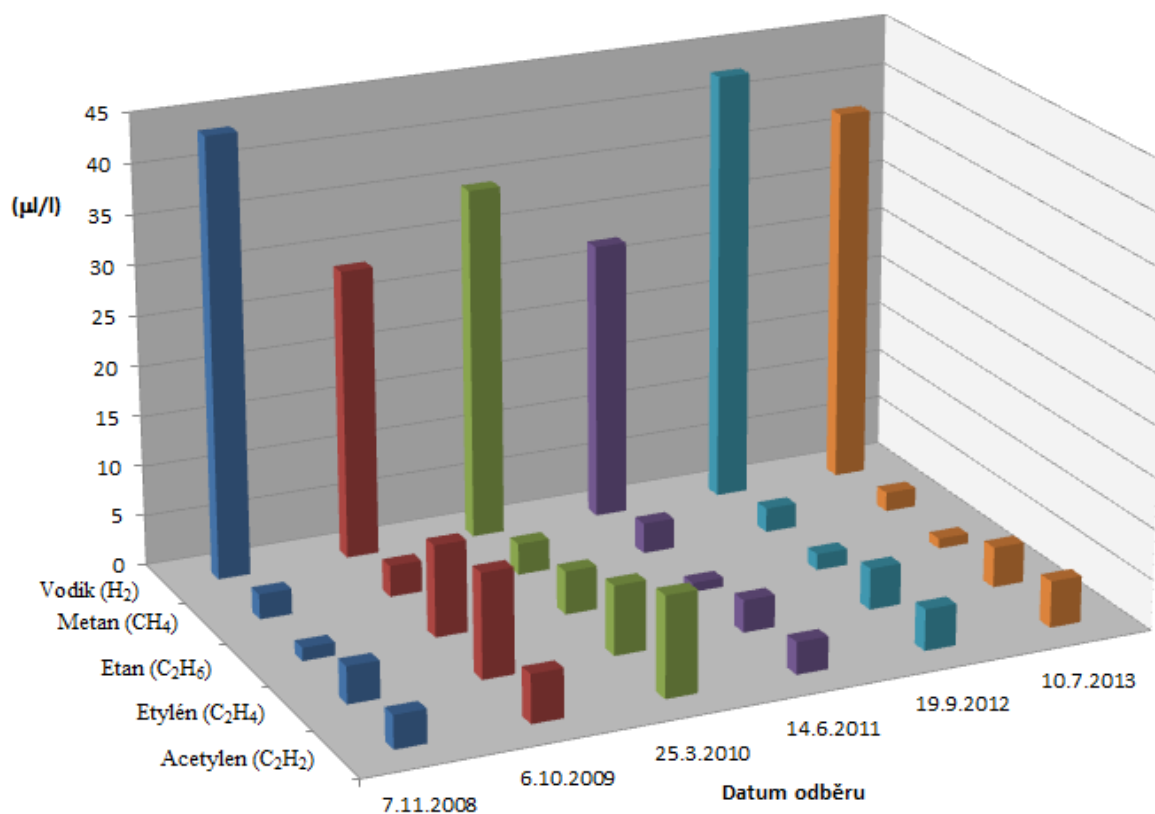
obr. 34 Grafické znázornění naměřených hodnot koncentrace plynů diagnostikovaného transformátoru.

a) Pořadí číselných hodnot koncentrace plynů

U transformátoru s dobrým technickým stavem by mělo platit, že nejvyšší číselnou hodnotu koncentrace má H_2 , pak následují CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 .

tab. 15 Pořadí číselných hodnot

Datum odběru	Vodík	Metan (CH_4)	Etan (C_2H_6)	Etylén (C_2H_4)	Acetylen (C_2H_2)	Stav
	($\mu l/l$)	($\mu l/l$)	($\mu l/l$)	($\mu l/l$)	($\mu l/l$)	
7. 11. 2008	43,8	2,5	1,3	3,7	3,3	Nevyhovující
6. 10. 2009	28,8	3,1	9,1	10,4	4,8	Nevyhovující
25. 3. 2010	35,0	3,1	4,3	6,9	10,0	Nevyhovující
14. 6. 2011	27,6	3,0	0,9	3,2	3,2	Nevyhovující
19. 9. 2012	42,9	2,4	1,6	4,1	4,1	Nevyhovující
10. 7. 2013	37,5	1,9	1,0	4,0	4,6	Nevyhovující



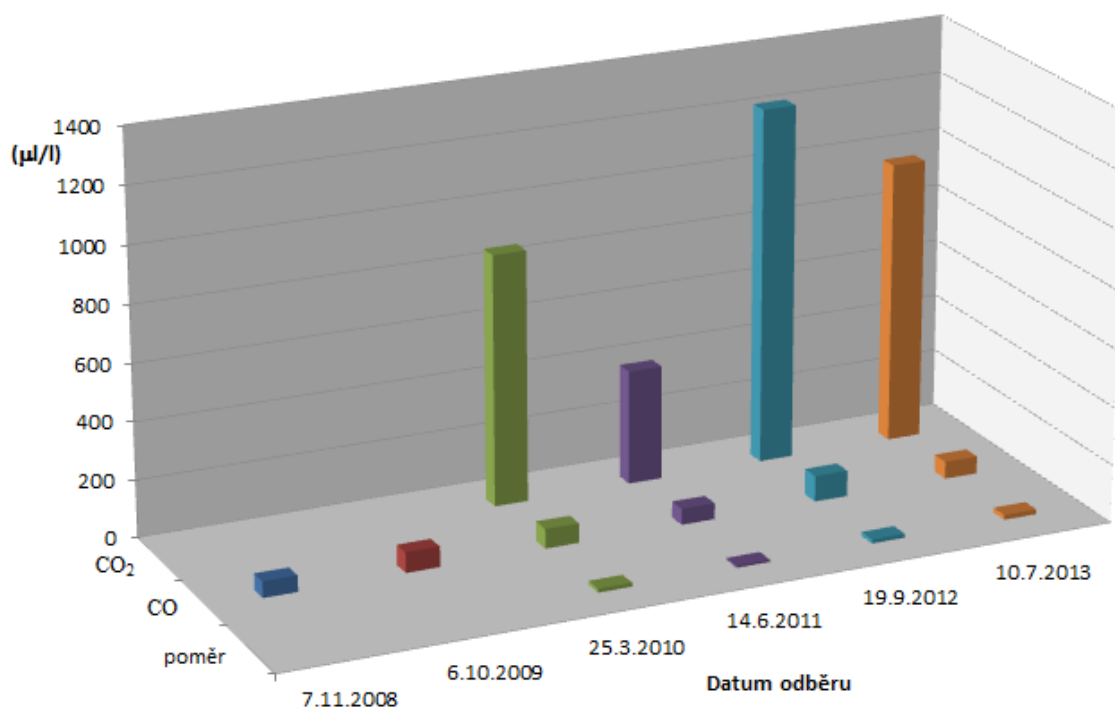
obr. 35 Grafické znázornění pořadí číselných hodnot koncentrace plynů.

b) Poměr oxidu uhličitého k oxidu uhelnatému

Dále je možno posoudit poměr CO_2/CO . Vyšší hodnoty poměru než 10 by mohly svědčit o tepelně zestárlé izolaci.

tab. 16 Poměr CO_2/CO

Datum odběru	Oxid uhličitý (CO_2) ($\mu\text{l/l}$)	Oxid uhelnatý (CO) ($\mu\text{l/l}$)	Poměr	Stav
7. 11. 2008		56,5		Nevyhovující
6. 10. 2009		70,5		Nevyhovující
25. 3. 2010	872,6	68,0	12,83	Nevyhovující
14. 6. 2011	396	55,6	7,12	Vyhovující
19. 9. 2012	1236,2	89,5	13,81	Nevyhovující
10. 7. 2013	978	60,3	16,22	Nevyhovující

obr. 36 Grafické znázornění poměru CO_2/CO .

c) Analýza vytěsněných plynů z transformátorových olejů

Výskyt jednotlivých složek v plynné směsi můžeme komentovat takto:

tab. 17 Výskyt plynů vzhledem k výbojové činnosti

Plyn	Druh výbojové činnosti			
	Výskyt	Elektrický oblouk	Jiskrové výboje	Částečné výboje
H ₂	Tepelné namáhání	Základní plyn charakterizující elektrický oblouk	Základní plyn charakterizující jiskrové výboje	Základní plyn charakterizující částečné výboje
CH ₄	Přehřátí oleje	Přítomný při elektrickém oblouku ve velkých objemech	Přítomný při jiskrovém výboji ve velkých objemech	Přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
C ₂ H ₄	Přehřátí oleje	Přítomný při elektrickém oblouku v malých objemech	Přítomný při jiskrovém výboji ve velkých objemech	Nepřítomný
C ₂ H ₂	Vysokoteplotní namáhání	Základní plyn charakterizující elektrický oblouk	Základní plyn charakterizující jiskrové výboje	Přítomný při částečných výbojích ve velkých objemech
C ₂ H ₆	Vzniká v oblasti nižších teplot	Přítomný při elektrickém oblouku ve velkých objemech	Nepřítomný	Nepřítomný

CO - je produktem teplotní degradace pevné izolace a jeho množství vyjadřuje velikost vady.

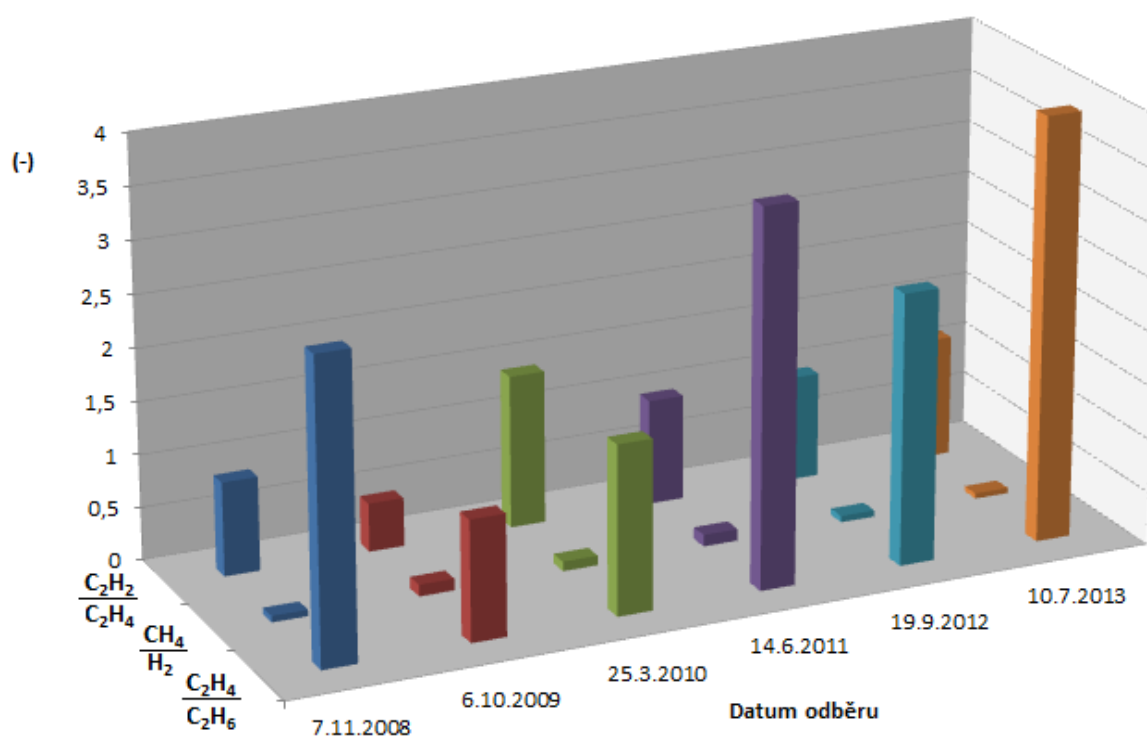
CO₂ - je produktem nízkoteplotního namáhání pevné celulóзовé izolace.

tab. 18 Vztah mezi poměrem plynů a charakteristickou poruchou

Rozsah poměrů	$\frac{C_2 H_2}{C_2 H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2 H_4}{C_2 H_6}$
< 0,1	0	1	0
0,1 ÷ 1	1	0	0
1 ÷ 3	1	2	1
> 3	2	2	2
Charakteristika poruchy			
Bez poruchy	0	0	0
Částečné výboje s malou hustotou energie	0	1	0
Částečné výboje s velkou hustotou energie	1	1	0
Nízkoenergetické výboje	1-2	0	1-2
Vysokoenergetické výboje	1	0	2
Lokální přehřátí 150°C	0	0	1
Lokální přehřátí 150 ÷ 300°C	0	2	0
Lokální přehřátí 300 ÷ 700°C	0	2	1
Lokální přehřátí 740°C	0	2	2

tab. 19 Poměry plynů

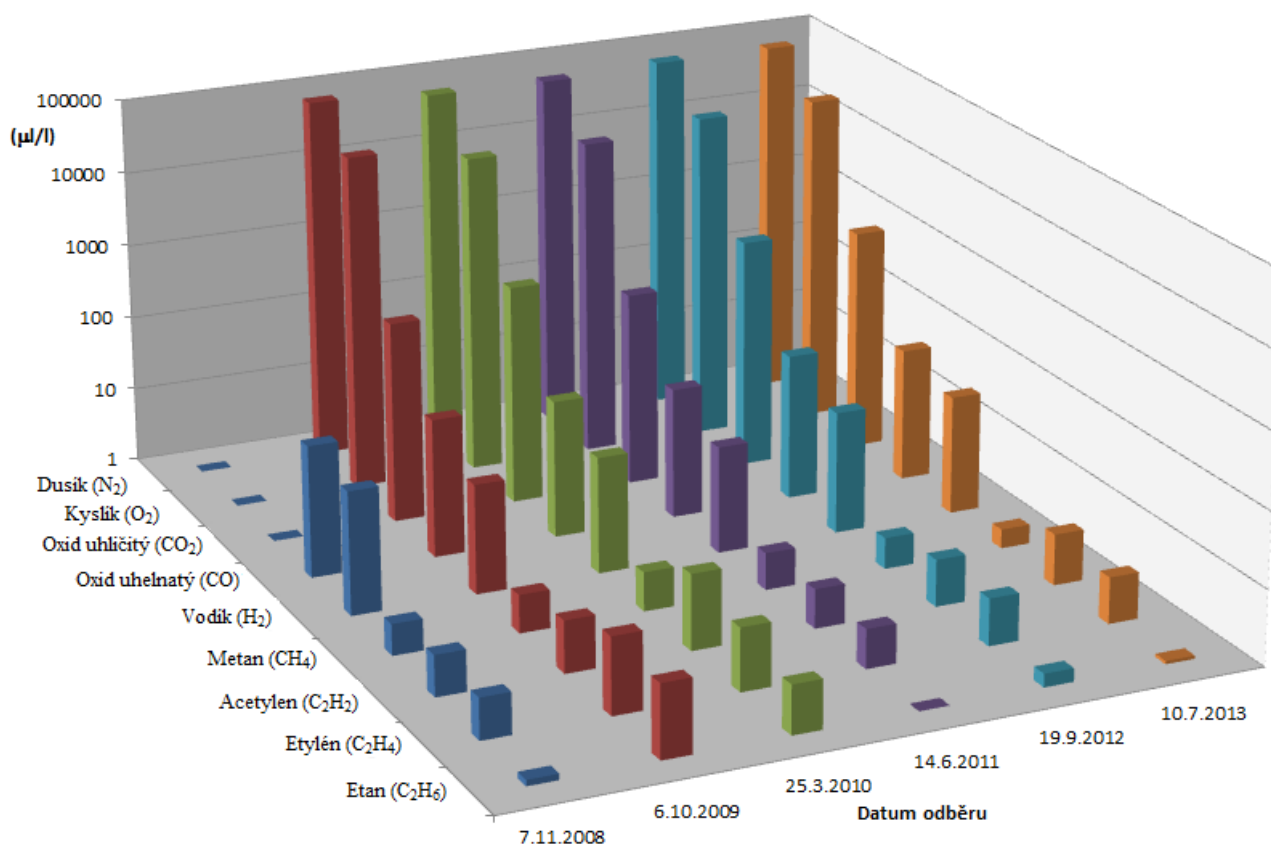
Datum odběru	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	Kód	Stav	Výsledek
7. 11. 2008	0,89 (1)	0,06 (1)	2,85 (1)	1 1 1		
6. 10. 2009	0,46 (1)	0,11 (0)	1,14 (1)	1 0 1	Nízkoenergetické výboje	Nevyhovující
25. 3. 2010	1,45 (1)	0,09 (1)	1,60 (1)	1 1 1		
14. 6. 2011	1 (1)	0,11 (0)	3,56 (2)	1 0 2	Vysokoenergetické výboje	Nevyhovující
19. 9. 2012	1 (1)	0,06 (1)	2,56 (1)	1 1 1		
10. 7. 2013	1,15 (1)	0,05 (1)	4 (2)	1 1 2		



obr. 37 Grafické znázornění poměrů plynů.

tab. 20 Transformátor – plynově – chromatografická analýza plynů rozpuštěných v oleji

		Přípustné hodnoty	7. 11. 2008	6. 10. 2009	25. 3. 2010	14. 6. 2011	19. 9. 2012	10. 7. 2013
		($\mu\text{l/l}$)	($\mu\text{l/l}$)	($\mu\text{l/l}$)	($\mu\text{l/l}$)	($\mu\text{l/l}$)	($\mu\text{l/l}$)	($\mu\text{l/l}$)
Dusík	N ₂		-	77371,4	61441,1	59755,8	68535,9	69703
Kyslík	O ₂		-	33170,7	19418,3	18931,2	26000,2	28101
Oxid uhličitý	CO ₂	11002	-	490,2	872,3	396,1	1237,2	979
Oxid uhelnatý	CO	1001	57,5	70,2	68,3	55,4	89,2	60,1
Vodík	H ₂	<150-200	43,7	28,6	35,3	26,6	42,5	38,5
Metan	CH ₄	50	2,6	3,2	3,3	3,1	2,6	1,8
Acetylen	C ₂ H ₂	16	3,5	4,9	10,1	3,3	4,2	4,8
Etylén	C ₂ H ₄	61	3,5	10,3	6,8	3,3	4,2	4,1
Etan	C ₂ H ₆	14	1,2	9,2	4,4	0,8	1,5	1,1



obr. 38 Grafické znázornění hodnot plynově-chromatografické analýzy plynů rozpuštěných v oleji (zobrazeno s logaritmickým měřítkem založeným na jednotce 10).

tab. 21 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2009

Zkouška		Jednotka	Hodnota						
Stanovení hodnoty průrazného napětí	U_{p1-6}	kV/2,5 mm	55,1	61,2	63,0	57,8	53,9	74,3	
	\bar{U}_p	kV/2,5 mm	60,9						
	S	kV/2,5 mm	7,4						
	V	%	12,2						
Stanovení obsahu vody v izolačním oleji	Q_v	mg/kg	15,6						
Číslo kyselosti	ČK	mg KOH/g	0,012						
Relativní mezipovrchové napětí olej-voda	σ	mN/m	44						
Hustota	ρ_v	g/ml	0,864						
Obsah antioxidantního inhibitoru	Q_i	% hmot.	0,30						

tab. 22 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2010

Zkouška		Jednotka	Hodnota						
Stanovení hodnoty průrazného napětí	U_{p1-6}	kV/2,5 mm	63,8	69,4	66,2	60,6	71,1	67,7	
	\bar{U}_p	kV/2,5 mm	66,5						
	S	kV/2,5 mm	3,8						
	V	%	5,7						
Stanovení obsahu vody v izolačním oleji	Q_v	mg/kg	16,6						
Číslo kyselosti	ČK	mg KOH/g	0,007						
Relativní mezipovrchové napětí olej-voda	σ	mN/m	45						
Hustota	ρ_v	g/ml	0,865						
Obsah antioxidantního inhibitoru	Q_i	% hmot.	27						

tab. 23 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2011

Zkouška		Jednotka	Hodnota						
Stanovení hodnoty průrazného napětí	U_{p1-6}	kV/2,5 mm	62,9	48,7	53,3	61,8	55,2	57,5	
	\bar{U}_p	kV/2,5 mm	56,6						
	S	kV/2,5 mm	5,3						
	V	%	9,4						
Stanovení obsahu vody v izolačním oleji	Q_v	mg/kg	19,8						
Číslo kyselosti	ČK	mg KOH/g	0,011						
Relativní mezipovrchové napětí olej-voda	σ	mN/m	-						
Hustota	ρ_v	g/ml	-						
Obsah antioxidantního inhibitoru	Q_i	% hmot.	-						

tab. 24 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2012

Zkouška		Jednotka	Hodnota						
Stanovení hodnoty průrazného napětí	U_{p1-6}	kV/2,5 mm	56,6	71,9	51,8	65,6	70,6	67,7	
	\bar{U}_p	kV/2,5 mm	64,0						
	S	kV/2,5 mm	8,1						
	V	%	12,7						
Stanovení obsahu vody v izolačním oleji	Q_v	mg/kg	15,8						
Číslo kyselosti	$\check{C}K$	mg KOH/g	0,011						
Relativní mezipovrchové napětí olej-voda	σ	mN/m	-						
Hustota	ρ_v	g/ml	-						
Obsah antioxidačního inhibitoru	Q_i	% hmot.	-						

tab. 25 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2013

Zkouška		Jednotka	Hodnota						
Stanovení hodnoty průrazného napětí	U_{p1-6}	kV/2,5 mm	58,0	57,4	74,9	67,3	70,9	63,8	
	\bar{U}_p	kV/2,5 mm	65,4						
	S	kV/2,5 mm	7,0						
	V	%	10,7						
Stanovení obsahu vody v izolačním oleji	Q_v	mg/kg	19,3						
Číslo kyselosti	$\check{C}K$	mg KOH/g	0,008						
Relativní mezipovrchové napětí olej-voda	σ	mN/m	-						
Hustota	ρ_v	g/ml	-						
Obsah antioxidačního inhibitoru	Q_i	% hmot.	-						

3.1.9 Aplikace diagnostické metody – infračervená termografie

Účelem tohoto měření bylo zmapování teplotních polí pro vyhodnocení stavu chladicího olejového systému a případné vyhledání a označení defektních míst. Dalším cílem bylo detektování možné nesymetrie teplot chladicího systému diagnostikovaného transformátoru.

Pro transformátor byly pořízeny snímky za pomoci infračervené kamery a digitálního fotoaparátu, a to pro srovnání. Snímky byly pořízeny pro různé pohledy. Aktuální zatížení transformátoru v době měření bylo cca 15% jmenovitého výkonu. Klimatické podmínky v průběhu měření: bezvětří, venkovní teplota 12 °C, vlhkost vzduchu 61 %.

Technické prostředky použité při měření:

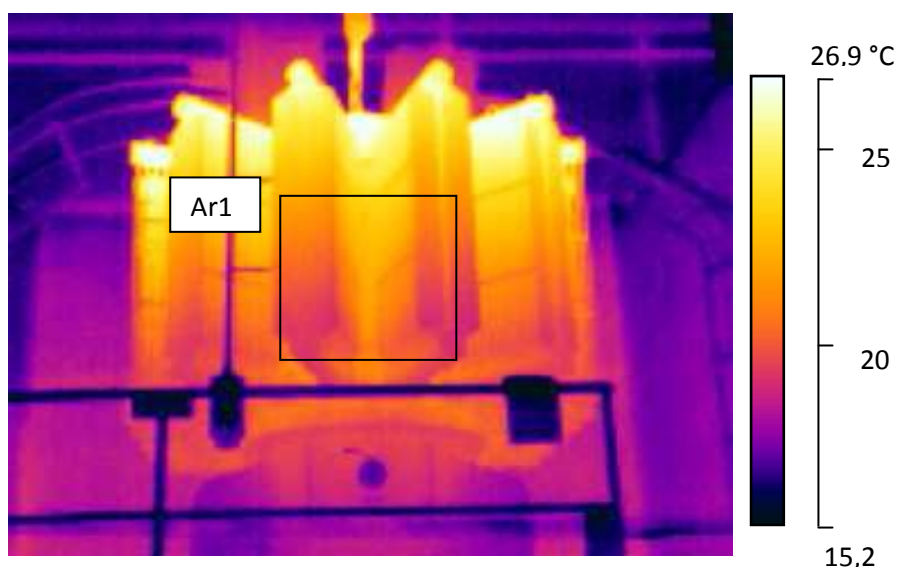
- Infračervená kamera FLIR ThermaCAM™ E series, typ E45, rozlišení 160 x 120. Emisivita nastavena na konstantní hodnotu $\epsilon=0,96$.
- Software ThermaCAM™ QuickView 2.0 verze 2.0.0.89.
- Digitální fotoaparát Panasonic LUMIX DMC-FT4.
- Digitální teploměr a vlhkoměr EXTECH Instruments EasyView™ 25, v. č. 20168, Platnost kalibrace do 16. 12. 2014.

Výsledky jednotlivých měření:**Čelní pohled na transformátor**

obr. 39 Reálný snímek – čelní pohled.

tab. 26 Data termografického měření, čelní pohled

Label	Value
IR: DateOfCreation	26. 7. 2013
IR: TimeOfCreation	5:55:29
IR: FileName	IR_0093.jpg
IR: Max	28.0 °C
IR: Min	13.2 °C
Ar1: Max	23.8 °C
Ar1: Min	18.7 °C
Ar1: Max - Min	5.0 °C



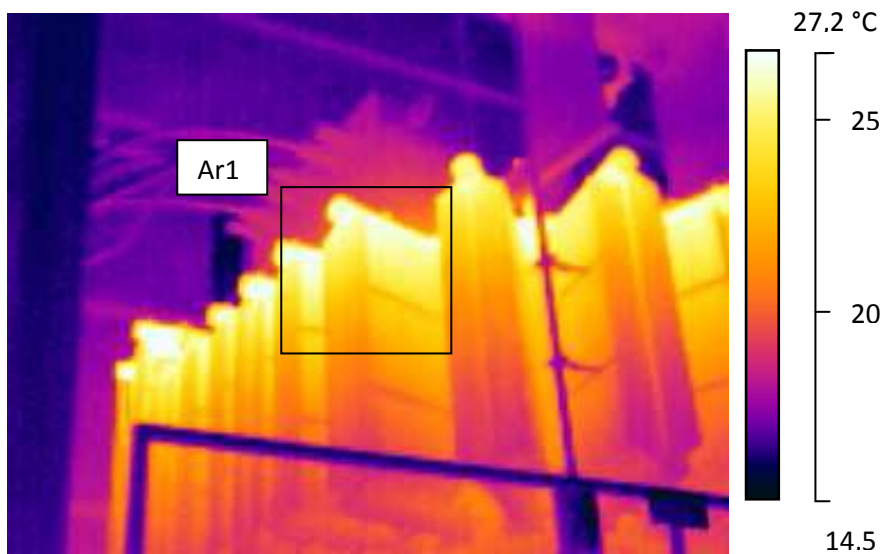
obr. 40 Termografický snímek – čelní pohled.

Levý boční pohled na transformátor

obr. 41 Reálný snímek – levý boční pohled.

tab. 27 Data termografického měření,
levý boční pohled

Label	Value
IR: DateOfCreation	26. 7.2013
IR: TimeOfCreation	5:57:39
IR: FileName	IR_0095.jpg
IR: Max	28.4 °C
IR: Min	13.1 °C
Ar1: Max	27.4 °C
Ar1: Min	18.6 °C
Ar1: Max - Min	8.9 °C



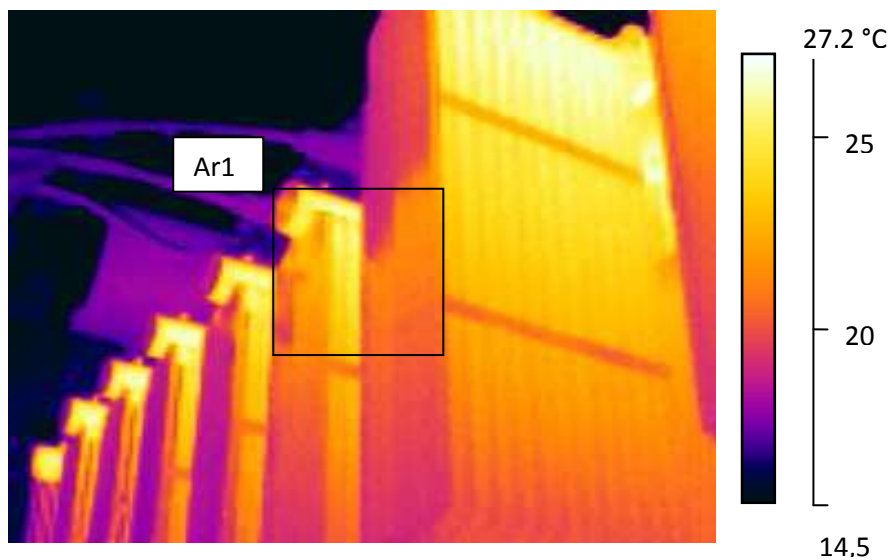
obr. 42 Termografický snímek – levý boční pohled.

Pohled na levou zadní část transformátoru

tab. 28 Data termografického měření,
levá zadní část

Label	Value
IR: DateOfCreation	26. 7.2013
IR: TimeOfCreation	5:58:21
IR: FileName	IR_0096.jpg
IR: Max	27.1 °C
IR: Min	-14.5 °C
Ar1: Max	26.5 °C
Ar1: Min	16.2 °C
Ar1: Max - Min	10.2 °C

obr. 43 Reálný snímek – levá zadní část.



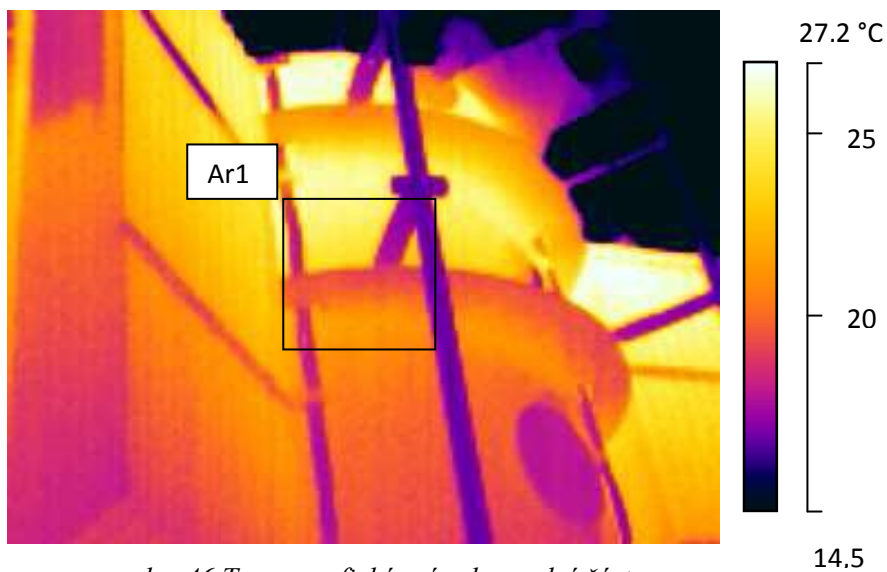
obr. 44 Termografický snímek – levá zadní část.

Pohled na zadní část transformátoru

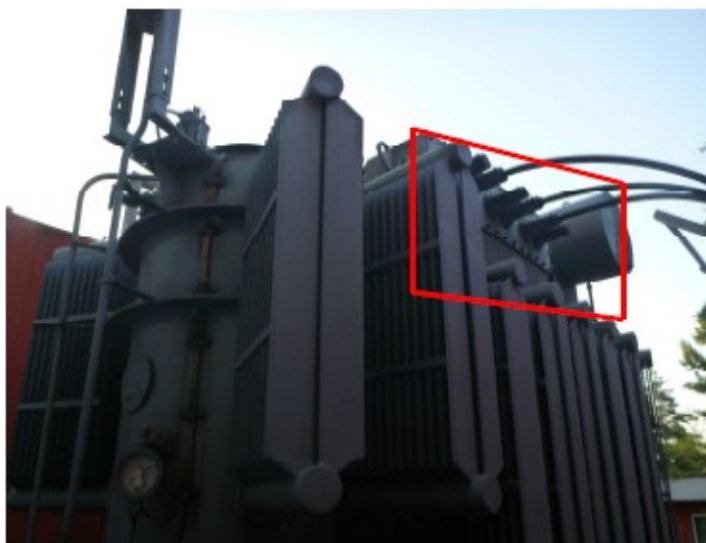
obr. 45 Reálný snímek – zadní část.

tab. 29 Data termografického měření,
zadní část

Label	Value
IR: DateOfCreation	26. 7.2013
IR: TimeOfCreation	5:58:29
IR: FileName	IR_0097.jpg
IR: Max	27.5 °C
IR: Min	-16.2 °C
Ar1: Max	26.6 °C
Ar1: Min	18.1 °C
Ar1: Max - Min	8.5 °C



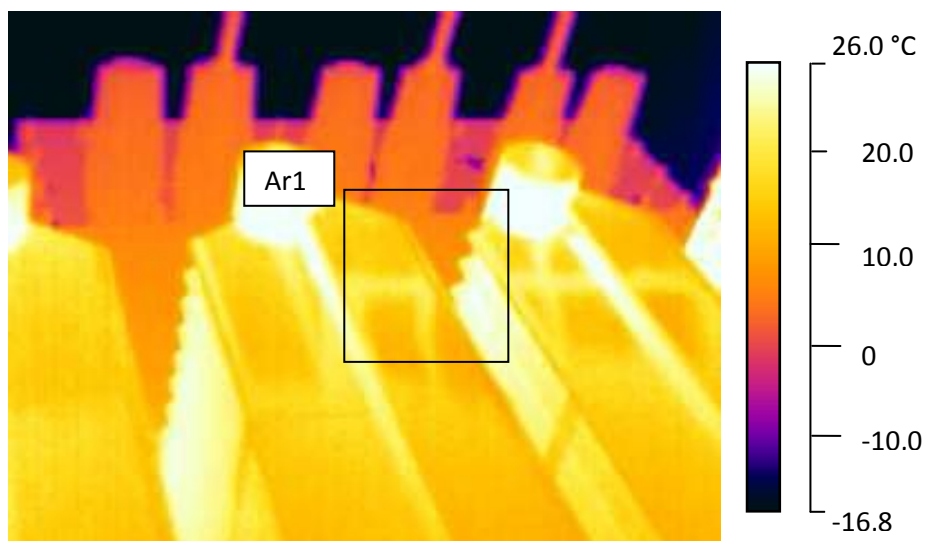
obr. 46 Termografický snímek – zadní část.

Pohled na pravou část transformátoru

obr. 47 Reálný snímek – pravá část.

tab. 30 Data termografického měření, pravá část

Label	Value
IR: DateOfCreation	26. 7. 2013
IR: TimeOfCreation	5:59:07
IR: FileName	IR_0099.jpg
IR: Max	27.3 °C
IR: Min	*21.2 °C
Ar1: Max	26.6 °C
Ar1: Min	16.0 °C
Ar1: Max - Min	10.5 °C



obr. 48 Termografický snímek – pravá část.

4. Vyhodnocení naměřených dat

4.1 Hodnocení technického stavu transformátoru dle jednotlivých diagnostických metod

Na základě aplikace jednotlivých diagnostických metod na výkonovém transformátoru - 6,3 MV·A 22/6 kV jsem dospěl k těmto jednotlivým hodnocením:

a) Měření transformátoru naprázdno

Na diagnostikovaném transformátoru bylo provedeno měření ve stavu naprázdno, za účelem zjištění stavu magnetického obvodu tohoto stroje. Výsledky měření transformátoru naprázdno, které byly vypočteny z časových průběhů napětí a proudů, viz obr. 25, jsou uvedeny v tab. 5. Jak z této tabulky vyplývá, došlo ke zvýšení ztrát naprázdno oproti hodnotám z výstupní kontroly provedené výrobcem. Zvýšení je konkrétně o 57,9% pro tento transformátor. Zvýšené ztráty signalizují, že došlo ke snížení činitele jakosti a zhoršily se vlastnosti magnetického obvodu.

b) Měření ztrátového činitele

Další z diagnostických metod aplikovaných na transformátoru byla metoda určení ztrátového činitele. Toto měření bylo provedeno za pomoci měřicí aparatury Delta 4000 v zapojení dle obr. 27. Jednotlivé naměřené hodnoty ztrátového činitele jsou uvedeny v tab. 6. Napěťová závislost ztrátového činitele a kapacity vinutí transformátoru je zobrazena na obr. 28. Hodnota mediánu 3,52 byla stanovena ze zdrojových hodnot grafického zobrazení. Tato hodnota odpovídá napájení 6 kV. Jestliže jsem dosaženou hodnotu mediánu porovnal s hodnotami doporučenými dle tab. 7, zjistil jsem, že tato hodnota je mimo povolený rozsah (0,3 – 0,5). Na základě těchto výsledků musím konstatovat, že dochází ke zvýšení činné složky proudu, která prochází dielektrikem a to zejména složky svodové. Dohromady to dává jasný signál o snížení celkového izolačního stavu diagnostikovaného transformátoru.

c) Impulsní srovnávací zkouška

Pro vyšetření přítomnosti mezizávitových nebo mezifázových zkratů byla použita diagnostická metoda – zkouška rázovou vlnou. Byly posuzovány dva naměřené průběhy napěťového přechodového děje a na základě integrálního kritéria (diference plochy odezev) provedeno vyhodnocení. Zkouška rázovou vlnou na diagnostikovaném transformátoru neprokázala přítomnost mezifázového nebo mezizávitového zkratu, jak dokazují výsledné hodnoty v tab. 9.

d) Měření izolačního odporu vinutí

V rámci posuzování celkového stavu izolačního systému diagnostikovaného transformátoru se provedlo měření zdánlivého izolačního odporu, koeficientu dielektrické absorpce DAR, indexu polarizace PI a pro vyšetření poškození jedné vrstvy dielektrika bylo měření doplněno o test vybíjení dielektrika DD. Diagnostika byla provedena na straně 6kV a 22kV měřeného transformátoru. Vzhledem k výsledným hodnotám uvedeným v tab. 10, 11, 12, 13, můžu konstatovat, že transformátor má nedostatečný stav izolačního systému. Z hlediska celkového izolačního stavu stroje tento výsledek jenom doplňuje výsledky měření ztrátového činitele, viz kapitola 3.1.5 a měření naprázdno viz kapitola 3.1.4, které taktéž indikují nedobrý stav izolačního systému transformátoru.

e) Transformátorový olej

V rámci další diagnostické metody byl proveden rozbor transformátorového oleje. Výsledky tohoto rozboru vypovídají o zhoršeném až špatném stavu tohoto oleje. Tento stav byl diagnostikován na základě jednotlivých analýz výsledků laboratorních zkoušek dle předem určených zkušebních metod. První metoda – *pořadí číselných hodnot koncentrace plynů* – výsledné hodnoty odhalily špatný stav. Druhá metoda – *poměr oxidu uhličitého k oxidu uhelnatému* – výsledné hodnoty odhalily špatný stav. Třetí metoda – *analýza vytěsněných plynů z transformátorových olejů* – výsledné hodnoty odhalily špatný stav. Výsledné hodnoty jednotlivých diagnostických metod jsou uvedeny v tab. 15, 16, 19. Na základě těchto výsledků je nutno konstatovat, že izolační stav transformátoru je ve špatném stavu.

f) Infračervená termografie

Na transformátoru se provedlo měření povrchové teploty všech jeho dostupných ploch. Účelem tohoto měření bylo zmapovat jednotlivá teplotní pole a odhalit případné defektní místa v olejovém systému, nebo teplotní nesymetrie chladicího a izolačního systému. Měření za pomoci infračervené kamery a digitálního fotoaparátu neodhalilo žádné poruchy v rozložení teplotních polí transformátoru, viz výsledky jednotlivých měření v kapitole 3.1.9. a níže uvedené jednotlivé analýzy.

Analýza termografického měření – čelní pohled

Na termografickém snímku viz obr. 40, je vidět teplotní profil celé čelní strany chladicího systému transformátoru. Nejvyšší teploty dosahuje dle předpokladu v horní části chladiče. Celé teplotní pole nevykazuje defektní místa. Systém chlazení je z tohoto pohledu v pořádku.

Analýza termografického měření – levý boční pohled

Na termografickém snímku viz obr. 42, je zobrazen teplotní profil části levé strany transformátoru. Nejvyšší teploty je dosaženo v horní části chladicího systému. Stejně tak jako na snímcích pravé strany ani z této strany není úhel pohledu ideální. Teplotní pole má však předpokládané rozložení a je bez defektních míst.

Analýza termografického měření – levá zadní část

Na termografickém snímku viz obr. 44, je zobrazen teplotní profil zadní části levé strany transformátoru. Nejvyšší teploty je dosaženo v horní části chladicího systému. Teplotní pole má však předpokládané rozložení a je bez defektních míst.

Analýza termografického měření – zadní část








Na termografickém snímku viz obr. 46, je zobrazen teplotní profil zadní části transformátoru. Nejvyšší teploty je dosaženo v horní části chladicího systému. Teplotní pole má však předpokládané rozložení a je bez defektních míst.

Analýza termografického měření – pravá část

Na termografickém snímku viz obr. 48, je zobrazen teplotní profil části pravé strany transformátoru. Teplotní pole má předpokládané rozložení a je bez defektních míst.

Jednoduchý přehled výsledků jednotlivých metod je uveden v tab. 31.

tab. 31 Přehled výsledků jednotlivých metod

Metoda	Výsledek
Vizuální kontrola transformátoru	
Impulsní (rázová) srovnávací zkouška	
Infračervená termografie	
Měření transformátoru naprázdno	
Měření ztrátového činitele	
Transformátorový olej	
Izolační stav	

4.1.1 Trend vývoje jednotlivých kritérií (2010 – 2013)

Trend vývoje jednotlivých kritérií lze hodnotit takto:

- Z hlediska vizuálního stavu byl transformátor v letech 2010 - 2013 kontrolován při každodenních pravidelných pochůzkách v rámci provozních inspekcí. Kontrolu prováděli provozní elektrikáři. Na transformátoru se za celou kontrolovanou dobu objevovala netěsnost v oblasti průchodek.
- Výsledek impulsní zkoušky je podobný jako v roce 2010, tzn., že u sledovaného transformátoru nedošlo z hlediska této zkoušky ke změnám, proto je výsledek označován jako setrvalý stav.
- Z hlediska vlastností chladicího systému testovaného pomocí Infračervené termografie lze označit stav transformátoru za setrvalý.
- V případě hodnocení stavu transformátoru dle ztrát naprázdno došlo ke zhoršení stavu transformátoru, kdy hodnota udávaná výrobcem je 9030 W. V roce 2010 bylo naměřeno 11882 W a v roce 2013 byla zjištěna hodnota 14259 W. Do roku 2013 došlo k nárůstu ztrát naprázdno o 57,9 % oproti hodnotě udávané výrobcem.
- Měření ztrátového činitele a měření izolačního stavu nebylo v roce 2010 provedeno, nelze proto hodnotit trend vývoje.
- Z hlediska vývoje stavu transformátorového oleje se jedná o setrvalý stav, kdy izolační systém vykazuje trvale zhoršení vlastností.

tab. 32 Trend vývoje jednotlivých kritérií

Metoda	Trend 2010 - 2013
Vizuální kontrola transformátoru	Nehodnoceno
Impulsní (rázová) srovnávací zkouška	Setrvalý stav
Infračervená termografie	Setrvalý stav
Měření transformátoru naprázdno	Zhoršení stavu
Měření ztrátového činitele	Nehodnoceno
Transformátorový olej	Setrvalý stav
Izolační stav	Nehodnoceno

4.2 Závěrečné hodnocení diagnostikovaného transformátoru

Na základě výsledků z jednotlivých diagnostických metod aplikovaných na vybraném transformátoru a vývoje jednotlivých kritérií je možné označit stav tohoto stroje za velmi špatný. Izolační systém transformátoru je ve velmi špatném stavu. Vzhledem k tomuto technickému stavu je doporučena výměna transformátoru pokud možno v co nejbližším možném termínu. Celkový technický stav tohoto transformátoru je pro další provozování nebezpečný a již nezaručuje další spolehlivý provoz v rámci vlastní spotřeby teplárny. Výměnu transformátoru je nutno realizovat i z hlediska ekonomiky provozu z důvodu nárůstu ztrát naprázdno a neoptimálního provozního zatížení. V potaz je nutno taky brát stáří transformátoru, které se pohybuje za hranicí projektované životnosti.

Vizuální kontrolou byly zjištěny netěsnosti v oblasti průchodek na straně 6 kV. Pokud se bude transformátor dále provozovat, je nutno průchodky přetěsnit.

4.3 Hodnocení metod použitých u diagnostiky transformátoru

Pro vyhodnocení použitých diagnostických metod z hlediska kvality, přesnosti, účelnosti ve smyslu určení technického stavu transformátoru jsem použil vybraná kritéria.

Zvolil jsem tato kritéria:

- a) **Celková účinnost metody** (kvalita aplikace ve smyslu odhalení nežádoucích poruchových stavů a stanovení celkového technického stavu zařízení).
- b) **Predikce budoucího stavu stroje** (schopnost dané metody předpovědět, jakým způsobem se do budoucna bude vyvíjet diagnostikovaný stav zařízení).
- c) **Detekce skrytých vad** (schopnost metody odhalit vady nebo poruchy, které se neprojevují pravidelně a mají nestandardní průběh).
- d) **Technická (ne)náročnost kontroly** (posuzuje se z hlediska použitého diagnostického měřicího zařízení, jeho ceny, náročnosti instalace, možnosti použití za provozu, náročnosti na kvalifikaci obsluhy apod.)

Pro váhu jednotlivých kritérií jsem použil koeficienty v rozmezí 0 – 4, kde 0 je minimum a 4 je maximum (čím vyšší koeficient, tím vyšší váha). Pro jednotlivá hodnocení daných metod jsem použil bodový systém v rozsahu 0 – 20 bodů, kdy každé metodě jsem přiřadil určitý počet bodů dle splnění daného kritéria. Minimum je 0 bodů maximum 20 bodů (čím více bodů, tím lepší umístění). Přehled diagnostických metod a jejich hodnocení je v tab. 33.

tab. 33 Hodnocení diagnostických metod dle jednotlivých kritérií

<i>Kritérium</i> <i>Diagnostická metoda</i>	Celková účinnost	Predikce budoucího stavu	Detekce skrytých vad	Technická (ne)náročnost kontroly	Celkové hodnocení
Vizuální kontrola transformátoru	5	4	2	20	72,7
Měření ztrát naprázdno	10	8	6	10	97,4
Měření ztrátového činitele	18	16	10	4	152,2
Impulsní (rázová) srovnávací zkouška	13	11	18	7	148,1
Měření izolačního odporu vinutí	9	10	7	16	112,9
Diagnostika olejů	16	15	16	12	174,0
Infračervená termografie	8	7	5	14	91,0
Váha	3,9	2,8	3	1,8	

4.3.1 Celkové hodnocení jednotlivých diagnostických metod

Jak již vyplývá z výše uvedených výsledků, viz tabulka 33, nejlépe hodnocenou metodou je metoda diagnostiky transformátorového oleje. Tato metoda je rozsáhlá, skládá se s jednotlivých odběrů oleje z diagnostikovaného transformátoru, převezení do laboratoří a následných rozborů (barva izolačního oleje, zákal izolačního oleje, přítomnost inhibitorů, viskozita, měření částečných výbojů, chromatografický rozbor atd.) V olejovém transformátoru plní izolační olej především funkci chladicího, izolačního a cirkulačního média. Působí však i jako přenosový člen nejen pro složky vnějšího prostředí, které přispívají k znehodnocení obou izolantů (vzdušná vlhkost a kyslík), ale i pro plynné, kapalné a pevné látky, které vznikají následkem tepelného nebo oxidačního stárnutí izolační soustavy. Diagnostika je zaměřena právě na oblasti tepelně-oxidačního zestárnutí olejové náplně a navlhnutí elektroizolačního systému transformátoru. Lze tak zjistit nedostatek v provozování nebo i konstrukci a technologii olejem plněných zařízení. Kromě toho lze orientačně určit pomocí studia kapalných dielektrik i stupeň zestárnutí druhé složky v izolační soustavě – papíru. Tato metoda je vzhledem k rozsáhlosti laboratorních zkoušek velmi spolehlivý ukazatel případných degradací v izolačním systému transformátoru. [18]

Na druhém místě se umístila diagnostická metoda měření ztrátového činitele. Tato metoda velice komplexně diagnostikuje celkový izolační systém. Z tohoto hlediska je velice účinnou metodou. Na druhé straně je velice náročná na korekci teplot, kdy za určitých okolností testovaný izolační systém nemá vztažnou teplotu a je zapotřebí naměřené hodnoty na tuto teplotu korigovat. Dalším aspektem, který je nutno zmínit je proměnlivost charakteristik v souladu s postupnou degradací a stárnutím stroje. Proto je zapotřebí tyto korekční charakteristiky zjistit před započítáním každého měření. [25] Velikost ztrátového činitele $\tan \delta$ je přímo úměrná ztrátám energie, které jsou rozptýleny v dielektriku při jeho namáhání proměnným elektrickým polem. Měření ztrátového činitele izolačního systému transformátoru a jeho kapacity má význam pro posouzení jeho stavu a dalšího profylaktického sledování. Samotná velikost ztrátového činitele je ovlivněna polarizací měřeného dielektrika, teplotou či cirkulací izolačního média.

Na dalším místě v mém hodnocení skončila metoda zkoušky rázovou vlnou. Tato metoda je účinná v oblasti vinutí transformátoru, kde je schopna s velkou přesností detektovat mezizávítové nebo mezifázové zkraty. Z tohoto důvodu patří mezi důležité diagnostické metody, kdy dokáže odhalit defekty na vinutí již v počáteční fázi, a tak předejít možné havárii stroje s daleko většími následky pro celkové zařízení.

Na pomyslném čtvrtém místě je metoda měření izolačního odporu vinutí. Měření izolačního odporu vinutí patří bezesporu mezi nejstarší diagnostické metody transformátorů. Izolační odpor velmi citlivě reaguje na nejslabší místo systému izolace transformátoru, kdy pokles izolačního odporu je často spojován s vlhkostí a nečistotami, které jsou vodivé. Podrobný způsob měření je uveden v kapitole 2.1.4. Při posuzování naměřených hodnot se porovnávají aktuální hodnoty s hodnotami z předchozího měření, eventuálně s hodnotami nového stroje. Je-li změna vyšší než 40 %, je nutné vyšetřit její příčinu. Výsledky měření ukazují při pravidelných kontrolách na stárnutí izolace a postupné zhoršování její kvality.

Další v pořadí je metoda měření ztrát naprázdno. Cílem měření naprázdno je zjistit ztráty v železe, proud naprázdno a účinník naprázdno při jmenovitém napětí a jmenovité frekvenci. Pokud je transformátor připojen k napájení a je bez zátěže (naprázdno) vznikají v důsledku stálého přemagnetování v taktu síťové frekvence (50/60 Hz) stálé ztráty v železe. Ty tvoří přibližně ztráty naprázdno. Ztráty ve vinutí (ztráty v mědi) jsou závislé na zátěži a zvětšují se s druhou mocninou protékajícího proudu. Rozhodující je procházející proud případně zdánlivý výkon (činný výkon ku $\cos \varphi$) z připojené zátěže. Případné zvyšování těchto ztrát signalizuje zhoršování izolačních vlastností magnetického obvodu. [1]

Na předposledním místě je metoda infračervené termografie. Termografická metoda je úspěšně rozšířená jako nástroj kontrol elektrického zařízení, protože její předností je, že se kontrola uskutečňuje během normálního provozu bez zásahu do zařízení (měření je bezkontaktní a nedestruktivní). U olejových transformátorů je použití této metody trochu problematické z hlediska prevence, jelikož případné zjištění zvýšené teploty povrchu nádoby olejového transformátoru už může signalizovat větší poškození uvnitř transformátoru. Vychází se z toho, že pomalý přechod tepla z problémové oblasti vinutí nebo transformátorového oleje na povrch nádoby transformátoru, může mít za následek dlouhodobé, infračervenou kamerou nepozorovatelné degradace izolačního systému. Tato metoda je účinná u měření kontaktů, průchodek, spojení sběrů apod. Tuto metodu bych v případě výkonového olejového transformátoru použil jako doplňkovou.

Jako poslední se umístila metoda vizuální kontroly. Je nedílnou součástí všech kontrol a diagnostik. Jako jednoduchá metoda je na prvním počátku při odhalování poruch a závad na elektrických zařízeních včetně transformátorů. Tuto metodu je možno používat jak za provozu, tak i po odstavení elektrického zařízení.

5. Závěr

Velký rozvoj diagnostiky v posledních letech přispěl k výraznému zlepšení přesnosti i rozsahu použití diagnostiky v praxi. Vznikla spousta nových metod, které používají novějších a kvalitnějších vyhodnocovací zařízení, sledující technický stav daného zařízení. Tyto nové moderní způsoby diagnostiky elektrických strojů umožňují odhalit závady již v počínající fázi procesu poruchy a tím zabránit destrukci daného zařízení přímo za provozu, což za daných podmínek může mít dalekosáhlé následky pro celý provozovaný systém. Nedílnou součástí celého systému diagnostikování je i vhodný výběr jednotlivých metod pro diagnostiku daného elektrického zařízení tak, aby nedošlo k přehlédnutí určité lokální závady, nebo podhodnocení jejího vlivu na celkový stav stroje. U některých parametrů, které vyhodnocujeme je nutná i znalost dlouhodobého vývoje (trendů), kdy vyhodnocení z jedné hodnoty veličiny může být zkreslující. I z tohoto důvodu je nutné diagnostiku provádět systematicky.

V této práci se zabývám technickou diagnostikou netočivých strojů. Vycházím z teoretických rozborů jednotlivých metod a končím v praktické ukázce aplikace těchto metod na konkrétním transformátoru. V závěrečném hodnocení jsem mimo analýzu naměřených dat provedl i doporučení pro další provozování diagnostikovaného zařízení. Dále jsem zhodnotil jednotlivé metody z hlediska kvality určování technického stavu kontrolovaného stroje. Pro tato hodnocení jsem použil 4 kritéria, váhové koeficienty pro tato kritéria a bodový systém, kde čím více bodů diagnostická metoda získala, tím lépe se umístila v žebříčku hodnocení. Vycházel jsem ze subjektivního pohledu na význam jednotlivých diagnostických metod z hlediska kvality, přesnosti a účelnosti při provádění měření na kontrolovaném stroji. Tudíž pořadí důležitosti metod je pouze orientační, vytvořené za účelem možného výběru při nasazování těchto metod do praktického měření na daném zařízení. To znamená, že pokud bych vycházel z výše uvedeného pořadí jednotlivých metod, tak např. jako první bych provedl nenáročnou vizuální kontrolu, pak by následovalo měření transformátoru naprázdno. Po této zkoušce bych provedl diagnostiku transformátorového oleje, na kterou by navazovalo měření tg δ . Toto měření bych doplnil o impulsní (rázovou) srovnávací zkoušku. Samozřejmě by bylo i měření izolačního stavu vinutí a jako doplňující metodu bych použil měření infračervenou kamerou.

Na závěr bych chtěl ještě jednou zdůraznit, že nejdůležitějším faktorem pro spolehlivý chod transformátoru je dobrý stav izolace vinutí. Proto pravidelná a metodicky správně a pečlivě provedená diagnostika je základem pro bezproblémový chod daného zařízení. Pravidelné zkoušení izolačních látek umožní zjištění směru vývoje měřených veličin a tak i včasné zjištění možné rozvíjející se závady s možností eliminovat veškeré následky z ní vyplývající.

Použitá literatura

- [1] MENTLÍK, V. a kol. *Diagnostika elektrických zařízení*, Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] BARTÁK, A. a kol. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*, Praha: 1984, SNTL – Nakladatelství technické literatury.
- [3] KREIDL, M. a kol. *Diagnostické systémy*, Praha: 2001, Vydavatelství ČVUT, ISBN 80-01-02349-4.
- [4] ZÁLIŠ, K. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*, Praha 2005, Academia, ISBN 80-200-1358-X.
- [5] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*, Praha: BEN 2006.
- [6] MENTLÍK, V., PROSR, P., POLANDSKÝ, R. *Diagnostika transformátorů*, Výzkumný záměr MŠMT ČR MSM 4977751310. *Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice*. Dílčí zpráva. Plzeň: FEL 2006.
- [7] BERNAT, P., MIŠÁK, S. *Diagnostika asynchronního stroje*. In Sborník konference EPE 2011. Ed. Stanislav Rusek, Radomír Goňo, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, 179-182, ISBN 978-80-248-2393-5.
- [8] HEŘMAN, J a kol. *Průručka silnoproudé elektrotechniky*, Praha: 1984, SNTL – Nakladatelství technické literatury.
- [9] ČSN EN 60156: 1998 Izolační kapaliny – Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu – Zkušební metoda.
- [10] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím: Měření částečných výbojů*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [11] HAMATA, V., MĚŘIČKA, J., VOŽENÍLEK, P. *Elektrické stroje*, ČVUT Praha 1994.
- [12] DOMZALSKI, T. *Diagnostics of Power Transformers*, Proceedings of the Sixty Annual International Conferences of Doble Clients.
- [13] PETERSON, L. *Estimation of the Remaining Life of Power Transformers and their Insulation*, Electra No. 133, dec. 1990.
- [14] BELETSKY, ET AL. *Short – term Dielectrics Strength of HV Power transformer Insulation*, Electrichestvo, 1978, N9. (in Russian).

[15] SOKOLOV, V. *Methods to Improve Effectiveness of Diagnostics of Insulation Condition in large Power Transformers*, Thesis, The Technical University in Kiev, 1982. (in Russian)

[16] GRESTAD, T. *Arcing in Oil and Paper in 300 kV Winding*, 1997 CIGRE SC 12 Sydney Colloquium.

[17] MANEVICH, L. O. *Transformer oil processing*, Moscow, Energy, 1975. (in Russian)

[18] BARBORKA, V. *Diagnostika transformátorových olejů v návaznosti na prodloužení životnosti transformátor.* [cit. 12. 10. 2013]. Dostupné z:

<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25085>

[19] RŮŽIČKOVÁ, V. *Aspekty on-line diagnostiky transformátorů.* [PDF soubor].

[cit. 22. 10. 2013]. Dostupné z:

<<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/17.pdf>>

[20] PROSR, P., BRANDT, M. *Diagnostika olejem plněných transformátorů.* [PDF soubor].

[cit. 10. 2. 2014]. Dostupné z:

<http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2008/cislo4_2008/r2c4c3.pdf>

[21] SVOBODA, Š. *Měření teploty – bezkontaktní teploměry a termovizní kamery.*

[cit. 11. 2. 2014] Dostupné z:

<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26549>

[22] VŠB, FEI, KAT 410. *Elektrické stroje.* [PDF soubor]. [cit. 11.3. 2014]. Dostupné z:

<http://fei1.vsb.cz/kat410/www453/soubory/texty/ucebni_texty/se/cast_B_el_stroje/se_es_c1_naprnakr.pdf>

[23] NEZVAL, J. *Automatizace zkoušky rázovou vlnou na vinutí elektrických strojů a matematického vyhodnocení naměřených průběhů.* [PDF soubor]. [cit. 11. 2. 2014].

Dostupné z: <http://www.cs.vsb.cz/arg/worconf/wofex/2003/paper/p2645/elektroenergetika/nezval_josef.pdf>

[24] ALSTOM. *On – line monitorovací systém MS 3000.* [PDF soubor]. [cit. 2.4. 2014].

Dostupné z:

<<http://www.alstom.com/Global/Czech%20Republic/Resources/Documents/V%C3%BDkono v%C3%A9%20transform%C3%A1tory%20MS%203000%20-%20On-line%20monitorovac%C3%AD%20syst%C3%A9m.pdf>>

[25] STRAKA, V., ZÍTEK, P., KRŇOUL, A. *Teplotní korelace C a tg δ založená na skutečné odezvě transformátorů.* [PDF soubor]. [cit. 11. 4. 2014]. Dostupné z:

<<http://www.megger.sk/wp-content/uploads/2014/03/Teplotn%C3%AD-korekce-C-a-TG-delta-CIRED-11.pdf>>

[26] ČSN 351090. Metoda měření dielektrických parametrů izolace výkonových transformátorů. Úřad pro vynálezy a normalizaci, 1987.

[27] ČSN 351082. Výkonové transformátory, Metody oteplovacích zkoušek. Úřad pro vynálezy a normalizaci, 1987.

[28] ČSN EN 60422. Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních - Návod pro kontrolu a údržbu. Praha Český normalizační institut, 2007.

Seznam obrázků

obr. 1 Možnosti zapojení vinutí: a) vinutí spojené do hvězdy, b) vinutí spojené do trojúhelníku [2].	3
obr. 2 Měřicí přístroj odporu vinutí Raytech WR50-12.	3
obr. 3 Náhradní schéma transformátoru [11].	4
obr. 4 Schéma zapojení pro měření naprázdno na trojfázovém transformátoru s použitím dvou wattmetrů v Aronově zapojení [1].	5
obr. 5 Schéma zapojení měření převodu napětí [3].	5
obr. 6 Analyzátor BK-ELCOM v provedení PNA560 pro měření transformátoru ve stavu naprázdno.	6
obr. 7 Zjednodušený fázorový diagram 3fázového transformátoru ve stavu naprázdno [11].	8
obr. 8 Schéma zapojení pro měření ztrát a napětí nakrátko trojfázových transformátorů [1].	9
obr. 9 Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA500.12 pro měření transformátoru ve stavu nakrátko.	9
obr. 10 Měřič izolačních odporů Sefelec SE6545.	12
obr. 11 Určení ztrátového činitele $\tan \delta$. [11, 12]	13
obr. 12 Sada pro měření ztrátového činitele $\tan \delta$ Presco AG FT 12.	13
obr. 13 Měření ztrátového činitele Scheringovým můstkem [1].	14
Obr. 14 Blokové schéma testerů se strmou vlnou. [23]	15
Obr. 15 Rázový generátor SURGE TESTER PSG 212 A.	15
obr. 16 Průběh rázové vlny pro dvojici vinutí, vinutí U s poruchou (8x závitový zkrat).	16
obr. 17 Zařízení na regeneraci transformátorového oleje.	19
obr. 18 Regenerace oleje s typickými parametry oleje na vstupu a výstupu [4,8].	20
obr. 19 Zapojení při měření kapacit transformátoru [15].	21
obr. 20 Měřič kapacit Presco AG TG-1MOD.	21
obr. 21 Infračervená kamera Testo 870-I.	23
obr. 22 Síťová architektura monitorovacího systému MS 3000 [24].	28
obr. 23 Netěsnost v oblasti průchodek na straně 6 kV transformátoru.	30
obr. 24 Přehledové schéma zapojení měřicí aparatury ve stavu transformátoru naprázdno.	31
obr. 25 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_1 , U_2 , U_3 (kV) a proudů transformátorem I_1 , I_2 , I_3 (A) ve stavu naprázdno.	32
obr. 26 Fázorové znázornění napětí a proudů transformátoru ve stavu naprázdno.	33
obr. 27 Blokové schéma zapojení měřicí aparatury.	34
obr. 28 Napěťová závislost ztrátového činitele a kapacity vinutí transformátoru.	35
obr. 29 Přehledové schéma zapojení měřícího pracoviště při impulsní zkoušce.	36
obr. 30 Průběh rázové vlny pro dvojici vinutí, experimentální měření, průběh odezvy napětí fáze U a V (V), měření na straně 6kV transformátoru.	37
obr. 31 Průběh rázové vlny pro dvojici vinutí, experimentální měření, průběh odezvy napětí fáze U a V (V), měření na straně 22kV transformátoru.	37
obr. 32 Schéma zapojení pro měření izolačního odporu vinutí s rozpojeným uzlem.	38
obr. 33 Schéma zapojení pro měření izolačního odporu vinutí s nerozpojeným uzlem.	38
obr. 34 Grafické znázornění naměřených hodnot koncentrace plynů diagnostikovaného transformátoru.	41
obr. 35 Grafické znázornění pořadí číselných hodnot koncentrace plynů.	42
obr. 36 Grafické znázornění poměru CO_2/CO .	43
obr. 37 Grafické znázornění poměrů plynů.	45

obr. 38 Grafické znázornění hodnot plynově-chromatografické analýzy plynů rozpuštěných v oleji (zobrazeno s logaritmickým měřítkem založeným na jednotce 10).-----	46
obr. 39 Reálný snímek – čelní pohled. -----	50
obr. 40 Termografický snímek – čelní pohled. -----	50
obr. 41 Reálný snímek – levý boční pohled. -----	51
obr. 42 Termografický snímek – levý boční pohled. -----	51
obr. 43 Reálný snímek – levá zadní část. -----	52
obr. 44 Termografický snímek – levá zadní část. -----	52
obr. 45 Reálný snímek – zadní část. -----	53
obr. 46 Termografický snímek – zadní část. -----	53
obr. 47 Reálný snímek – pravá část. -----	54
obr. 48 Termografický snímek – pravá část. -----	54

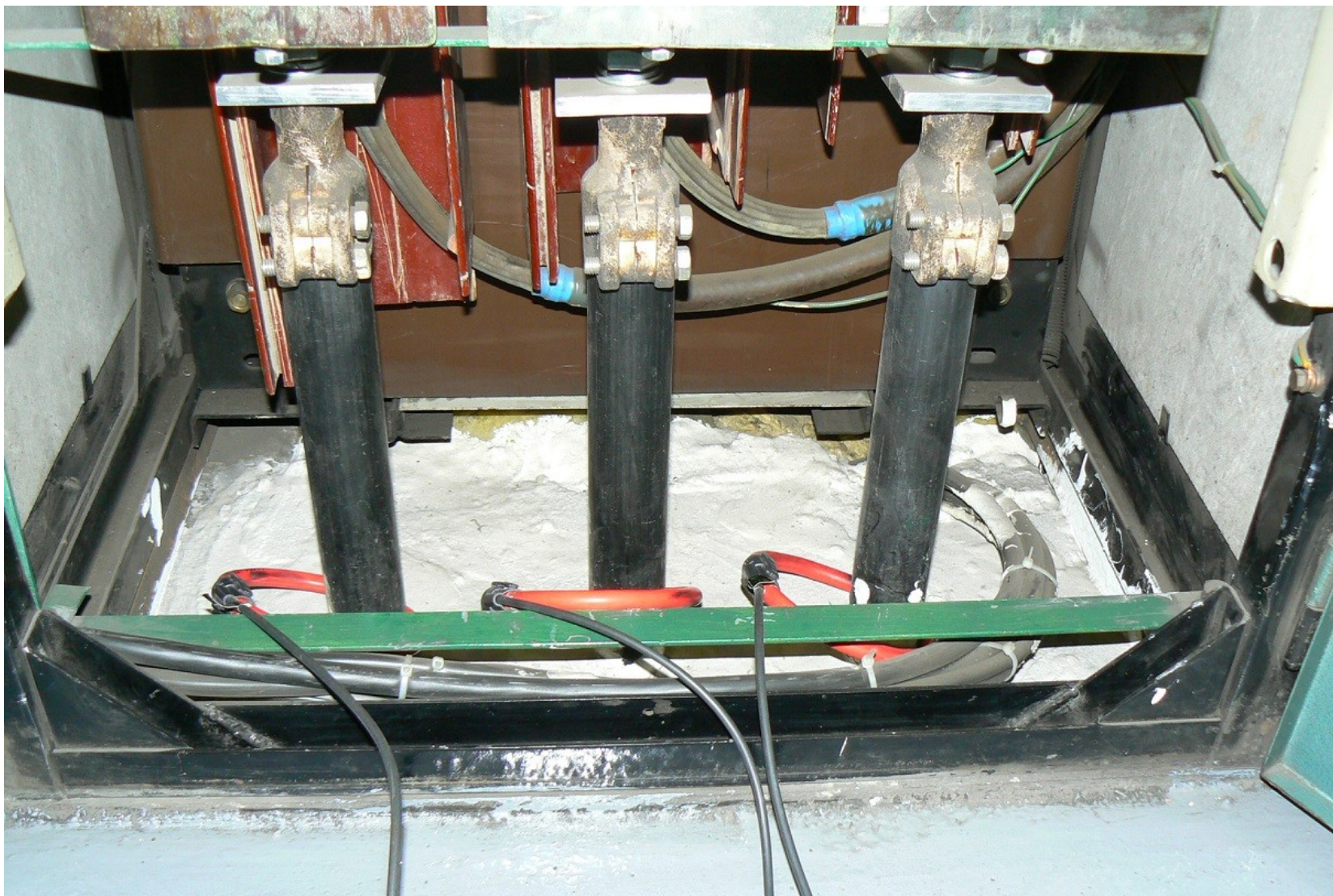
Seznam tabulek

tab. 1 Posouzení kvality izolace [2] -----	11
tab. 2 Posouzení kvality izolace [2] -----	11
tab. 3 Zapojení vinutí při měření kapacit vinutí [1, 2] -----	22
tab. 4 Mezní hodnoty poměru C_2/C_{50} [1,5] -----	22
tab. 5 Vyhodnocení okamžitých hodnot transformátoru ve stavu naprázdno -----	33
tab. 6 Naměřené hodnoty ztrátového činitele -----	34
tab. 7 Typické hodnoty ztrátového činitele [3] -----	35
tab. 8 Hodnoty ztrátového činitele dle IEEE 62-1995. -----	36
tab. 9 Výsledky vyhodnocení odezvy impulsní vlny dle integrálního kritéria pro měřený transformátor -----	37
tab. 10 Izolační odpor strany 6 kV transformátoru -----	39
tab. 11 Charakteristické veličiny strany 6 kV transformátoru -----	39
tab. 12 Izolační odpor strany 22 kV transformátoru -----	40
tab. 13 Charakteristické veličiny strany 22 kV transformátoru -----	40
tab. 14 Koncentrace jednotlivých plynů v transformátoru (v. č. 937838) -----	41
tab. 15 Pořadí číselných hodnot -----	42
tab. 16 Poměr CO_2/CO -----	43
tab. 17 Výskyt plynů vzhledem k výbojové činnosti -----	44
tab. 18 Vztah mezi poměrem plynů a charakteristickou poruchou -----	44
tab. 19 Poměry plynů -----	45
tab. 20 Transformátor – plynově – chromatografická analýza plynů rozpuštěných v oleji -----	46
tab. 21 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2009 -----	47
tab. 22 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2010 -----	47
tab. 23 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2011 -----	47
tab. 24 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2012 -----	48
tab. 25 Rozbor izolačního oleje transformátoru – 2013 -----	48
tab. 26 Data termografického měření, -----	50
tab. 27 Data termografického měření, -----	51
tab. 28 Data termografického měření, -----	52
tab. 29 Data termografického měření, -----	53
tab. 30 Data termografického měření, -----	54
tab. 31 Přehled výsledků jednotlivých metod -----	57
tab. 32 Trend vývoje jednotlivých kritérií -----	58
tab. 33 Hodnocení diagnostických metod dle jednotlivých kritérií -----	59

Seznam příloh

- A. Snímání proudu naprázdno pomocí Rogowského cívek na přívodním kabelovém vedení diagnostikovaného transformátoru.
- B. Měřicí aparatura diagnostické metody – měření ztrátového činitele
- C. Měřicí aparatura diagnostické metody – impulsní srovnávací zkouška
- D. Diagnostikovaný transformátor - 22/6 kV; 6,3 MV·A; typ: ERH 6577/61

Příloha A - snímání proudu naprázdno pomocí Rogowského cívek na přívodním kabelovém vedení transformátoru.



Příloha B – měřící aparatura diagnostické metody – měření ztrátového činitele.



Příloha C – měřící aparatura diagnostické metody – impulsní srovnávací zkouška.



Příloha D - diagnostikovaný transformátor - 22/6 kV; 6,3 MV·A; typ: ERH 6577/61.

